

Національний технічний університет України
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені Ігоря Сікорського»
МЕХАНІКО-МАШИНОБУДІВНИЙ ІНСТИТУТ
Кафедра технології машинобудування

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____ **Юрій ПЕТРАКОВ**
(підпис) (власне ім'я, прізвище)
« » _____ 2020р.

Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра
за освітньо-професійною програмою «Технології машинобудування»
зі спеціальності 131 «Прикладна механіка»

на тему: Дослідження точності з'єднань деталей отриманих із використанням
адитивних технологій _____

Виконав:
студент 6 курсу, групи МТ – 91мп

_____ **Карпенко Богдан Олександрович** _____

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник: к.т.н., доц. Володимир КОРЕНЬКОВ _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент: к.т.н., доц. Валерій ШИШКІН _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2020 року

РЕФЕРАТ

Структура та об'єм роботи. У магістерську дисертацію входить вступ, 4 розділи, загальні висновки, список використаної літератури. Робота складається з 77 сторінок тексту, 21 таблиці, 22 рисунків та 11 літературних джерел.

Актуальність теми. В наш час використання електронних та інформаційних технологій збільшилося у геометричній прогресії, створюючи нові можливості в різних сферах діяльності. Адаптивні технології швидко набирають популярності. Оскільки вони дають можливість швидкого прототипування – це дозволяє в короткий термін виготовити деталі та їх копії зі складною геометрією і що найважливіше досить дешево.

Мета та завдання. Метою є оцінка похибки в лінійних та діаметральних розмірах, з подальшим розрахунком граничних відхилень і величини зміщення центру групування реальних розмірів деталі відносно номінальних розмірів заданих на кресленні та виведення певних залежностей. Оцінка факторів що впливають на розмірну точність 3D – друку та визначення розмірності даної похибки, дозволить виконувати необхідну корекцію розмірів деталі для певної марки пластику та можливості гарантій збираємості.

Об'єкт дослідження. Об'єктом дослідження являється деталь, виготовлена за допомогою 3D – друку з PLA – пластику при різних режимах друку.

Предмет дослідження. Предметом дослідження є точність типових розмірів деталей виготовлених за різними параметрами друку.

Наукова новизна. Новизна результатів, що будуть одержані під час проведення наукового дослідження, полягає у тому що:

1. Розроблено методологічний підхід до виконання корекції розмірів для забезпечення необхідної точності деталей.

2. Розроблено алгоритм виконання корекції за емпіричними даними та їх аналізу.

Практичне значення наукових результатів. Результати наукового дослідження можуть бути використані у процесі покращення якості друкованих моделей за рахунок корекції розмірів трьохмірної моделі деталі, тим самим скорочення часу на підготовку. Оскільки методика розроблена в ході роботи буде відрізнятися лише матеріалом, а саме його характеристиками, то вона може буде використана для корекції розмірів друку як металом так і порошковими матеріалами.

Апробація результатів дисертації та публікації. Під час роботи над магістерською дисертацією була видана одна теза доповіді на конференції молодих вчених та студентів «Інновації молоді в машинобудуванні»:

Карпенко Б. О. Моделювання точності друку 3D принтера [Електронний ресурс] / Б. О. Карпенко, С. М. Лапач // Збірка праць Міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених та студентів «Інновації молоді в машинобудуванні», 2019-2020 Youth Innovations in Mechanical Engineering Механіко-машинобудівний інститут Національного технічного університету України «. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: <http://imm-mmi.kpi.ua/proc/article/view/201726>

Ключові слова: 3D принтер; адаптивні технології; адаптивне виробництво; регресійний аналіз; багатокритеріальна оптимізація; розмірна точність 3D – друку

РЕФЕРАТ

Структура и объем работы. В магистерскую диссертацию входит введение, 4 главы, выводы, список использованной литературы. Работа состоит из 77 страниц текста, 21 таблицы, 22 рисунков и 11 литературных источников.

Актуальность темы. В настоящее время использование электронных и информационных технологий увеличилось в геометрической прогрессии, создавая новые возможности в различных сферах деятельности. Адаптивные технологии быстро набирают популярность. Поскольку они дают возможность быстрого прототипирования - это позволяет в короткий срок изготовить детали и их копии со сложной геометрией и что самое важное довольно дешево.

Цель и задачи. Целью является оценка погрешности в линейных и диаметральных размерах, с последующим расчетом предельных отклонений и величины смещения центра группирования реальных размеров детали относительно номинальных размеров заданных на чертеже и вывода определенных зависимостей. Оценка факторов влияющих на соразмерную точность 3D - печати и определения размерности данной погрешности, позволит выполнять необходимую коррекцию размеров детали определенной марки пластика и возможности гарантий збираемости.

Объект исследования. Объектом исследования является деталь, изготовленная с помощью 3D - печати с PLA - пластика при различных режимах печати.

Предмет исследования. Предметом исследования является точность типовых размеров деталей изготовленных по различным параметрам печати.

Научная новизна. Новизна, что будут получены при проведении научного исследования, заключается в том что:

1. Разработан методологический подход к выполнению коррекции размеров для обеспечения требуемой точности деталей.

2. Разработан алгоритм выполнения коррекции по эмпирическим данным и их анализа.

Практическое значение научных результатов. Результаты научного исследования могут быть использованы в процессе улучшения качества печатных моделей за счет коррекции размеров трехмерной модели детали, тем самым сокращение времени на подготовку. Поскольку методика разработана в ходе работы будет отличаться лишь материалом, а именно его характеристиками, то она может быть использована для коррекции размеров печати как металлом так и порошковыми материалами.

Апробация результатов диссертации и публикации. Во время работы над магистерской диссертацией была издана один тезис доклада на конференции молодых ученых и студентов «Инновации молодежи в машиностроении»:

Карпенко Б. А. Моделирование точности печати 3D принтера [Электронный ресурс] / Б. А. Карпенко, С. М. Лапач // Сборник трудов Международной научно-технической конференции молодых ученых и студентов «Инновации молодежи в машиностроении», 2019-2020 Youth Innovations in Mechanical Engineering Механико-машиностроительный институт Национального технического университета Украины ». - 2020. - Режим доступа к ресурсу: <http://imm-mmi.kpi.ua/proc/article/view/201726>

Ключевые слова: 3D принтер адаптивные технологии; адаптивное производство; регрессионный анализ; многокритериальная оптимизация; размерная точность 3D - печати

ABSTRACT

Structure and scope of work. The master's dissertation includes an introduction, 4 chapters, general conclusions, a list of references. The work consists of 77 pages of text, 21 tables, 22 figures and 11 literary sources.

Actuality of theme. Nowadays, the use of electronic and information technologies has increased exponentially, creating new opportunities in various fields. Adaptive technologies are rapidly gaining popularity. Because they allow rapid prototyping - it allows you to quickly make parts and copies with complex geometry and, most importantly, quite cheap.

Purpose and objectives. The aim is to estimate the error in linear and diametrical dimensions, followed by the calculation of the marginal deviations and the magnitude of the offset of the centering group of the actual dimensions of the part relative to the nominal dimensions specified in the drawing and deriving certain dependencies. Estimation of the factors influencing dimensional accuracy of 3D - printing and definition of dimensionality of the given error, will allow to carry out necessary correction of the sizes of a detail for a certain brand of plastic and possibility of guarantees of collectability.

Object of study. The object of the study is a part made by 3D - printing from PLA - plastic in different printing modes.

Subject of study. The subject of the study is the accuracy of the typical dimensions of parts made for different printing parameters.

Scientific novelty. The novelty of the results that will be obtained during the research is that:

1. A methodological approach to dimensional correction has been developed to ensure the required accuracy of parts.
2. An algorithm for performing correction based on empirical data and their analysis has been developed.

The practical significance of scientific results. The results of scientific research can be used in the process of improving the quality of printed models by correcting the size of the three-dimensional model of the part, thereby reducing the preparation time. Since the technique developed in the course of work will differ only in the material, namely its characteristics, it can be used to correct the size of the print with both metal and powder materials.

Approbation of dissertation and publication results. During the work on the master's dissertation, one thesis was published at the conference of young scientists and students "Youth Innovation in Mechanical Engineering":

Karpenko BO Modeling of 3D printer printing accuracy [Electronic resource] / BO Karpenko, SM Lapach // Proceedings of the International scientific and technical conference of young scientists and students "Youth Innovation in Mechanical Engineering", 2019-2020 Youth Innovations in Mechanical Engineering Institute of Mechanical Engineering of the National Technical University of Ukraine ". - 2020. - Mode of access to the resource: <http://imm-mmi.kpi.ua/proc/article/view/201726>

Keywords: 3D printer; adaptive technologies, adaptive production; regression analysis; multicriteria optimization; dimensional accuracy of 3D printing

Зміст

ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1	10
1.1.Адаптивне виробництво та технології	10
1.2.Матеріали для 3Д – друку	16
1.3.Розмірні ланцюги	22
1.4.Висновки	30
РОЗДІЛ 2	33
2.1. Висування експериментальної гіпотези	33
2.2. Планування експерименту	35
2.3. Підготовка експерименту	38
2.4. Проведення експерименту	40
2.5. Статистична обробка експериментальних даних	41
2.6. Висновки й інтерпретація результатів	47
РОЗДІЛ 3	49
3.1. Планування перевірки	49
3.2. Проектування дослідного зразка	50
3.3. Підготовка зразків	51
4.1 Опис ідеї проекту	56
4.2 Технологічний аудит ідеї проекту	57
4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту	58
4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту	64
4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту	67
4.6 Висновки розділу	70
ЛІТЕРАТУРА	71
ДОДАТКИ	74

ВСТУП

Забезпечення точності в галузі машинобудування як розмірної, так і точності розташування, являється головною задачею. Таке поняття як точність впливає на якість, працездатність та експлуатаційні характеристики готового виробу. При проектуванні та розробці, з метою отримання якісного кінцевого продукту, необхідністю є врахування цих характеристик. На сьогодні існує достатньо багато технік, які можуть забезпечити високий рівень даних показників, але однією з найбільш перспективних та прогресивних є адаптивне виробництво.

Адаптивне виробництво – це швидке створення прототипу виробу, з метою перевірки конструкції, доопрацювання при наявності недоліків та затвердження дослідного зразку перед початком серійного виробництва. Поява миттєвої можливості тестування функціональності конструктивних властивостей виробу стало реальним технологічним проривом для виробничих та дизайнерських компаній. Адже це значно зменшує кількість помилок при розробці і подільному масовому виробництві, а також сприяє скороченню використовуваних матеріалів, що в свою чергу робить виробництво економнішим. Адаптивне виробництво дозволяє краще оцінити показники якості та функціональності готового виробу, що достатньо полегшує його майбутнє вдосконалення.

Метою роботи є розробка методики оцінки похибки в лінійних та діаметральних розмірах, з подальшим розрахунком граничних відхилень і величини зміщення центру групування реальних розмірів деталі відносно номінальних розмірів, заданих на кресленні та виведення певних залежностей для надання подальших рекомендацій для 3D-друку. Така можливість дає змогу передбачати реальні розміри надрукованих деталей та, на основі корегуючих даних, будувати розмірні ланцюги та проводити їх аналіз. При зростаючій популярності 3D-друку, дані етапи роботи створюють чудову платформу для вдосконалення цього процесу та зменшенню числа браку.

РОЗДІЛ 1

1.1. Адаптивне виробництво та технології

Адаптивне виробництво, котре також називається «швидке прототипування» – це швидке створення прототипу виробу з метою перевірки конструкції, доопрацювання при наявності недоліків та затвердження дослідного зразку перед початком серійного виробництва. В минулому виготовленням прототипів займалися спеціалізовані компанії, що збільшувало вартість на виготовлення виробу в серійному масштабі, в ситуації коли все добре і в конструкції немає недоліків. У випадку ж коли недоліки були виявленні, то все починається заново. Поява миттєвої можливості тестування функціональності конструктивних властивостей виробу стало реальним технологічним проривом для виробничих та дизайнерських компаній, що і стало поштовхом для розвитку ринку. Адже тепер можна було на місці створити, оглянути та перевірити ергономіку, якщо це необхідно, прототипу та запустити його у виробництво.

Основний принцип технології адаптивного виробництва полягає в тому, що модель створюється за допомогою CAD (Computer-Aided Design) систем. Дані моделі за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення розбиваються на шари та конвертуються в керуючу програму для 3D-принтера. Дана технологія безумовно є зручним інструментом у руках інженерів.

Даний принцип пошарового підходу закладений в конструкції майже всіх моделей принтерів, котрі відрізняються лише використанням матеріалом, методом створення шарів та їх сполученням між собою. На даний момент технологічних процесів склеювання матеріалів розроблено та введено в експлуатацію сім.

В основі адаптивного виробництва є адаптивні технології, котрі групуються по основним категоріям визначеними принципами класифікації. В наш час сформовано сім основних технологічних процесів категорії адаптивного виробництва:

- Фотополімеризація в ванній (Vat Photopolymerization, VP);
- Струменеве нанесення матеріалу (Material Jetting, MJ);
- Струменеве нанесення зв'язки (Binder Jetting, BJ);
- Синтез на підкладці (Powder Bed Fusion, PBF);
- Екструзія матеріалу (Material Extrusion, ME);
- Прямий підвід енергії та матеріалу (Directed Energy Deposition, DED);
- Листова ламінація (Sheet Lamination, SL);

Кожна з технологій адаптивного виробництва займає свою сферу застосування. Та має як переваги над рештою так і недоліки. Основні параметри трьох найбільш поширених процесів наведені в Табл. 1.1.1.

Таблиця 1.1.1. Параметри технологій адаптивного виробництва

Типи процесу	ME	VP	PBF
Категорії	Екструзія матеріалу (Material Extrusion)	Фотополімеризація в ванній (Vat Photopolymerization)	Синтез на підкладці (Powder Bed Fusion)
Основний принцип роботи	Крапельне нанесення матеріалу	Затвердіння рідкого полімеру у ванній	Теплова енергія діє на області порошку для побудови на підкладці
Приклади технологій	FDM FFF	SLA SLA Quick Cast	LS SLS

	<p>CFF</p> <p>CFC</p> <p>ADAM</p> <p>DIW</p>	<p>DLP</p> <p>CLIP</p>	<p>MJF</p> <p>LM</p> <p>SLM</p> <p>DMLS</p> <p>EBM</p>
Переваги	<ul style="list-style-type: none"> Виготовлення виробів зі складною геометричною формою та складною внутрішньою структурою Широкий вибір матеріалів Можливість комбінувати матеріали 	<ul style="list-style-type: none"> Виготовлення виробів зі складною геометричною формою та високим ступенем деталізації Висока точність та якість поверхонь 	<ul style="list-style-type: none"> Великий асортимент матеріалів Гарні механічні властивості готових виробів Друк геометрично складних виробів Не потрібні підтримки
Недоліки	<ul style="list-style-type: none"> Необхідність підтримок Висока степінь анізотропії 	<ul style="list-style-type: none"> Застосовуються тільки фото-полімери Необхідність підтримок Короткий термін служби готових деталей Низькі механічні властивості Незворотність процесу 	<ul style="list-style-type: none"> Високі затрати електроенергії Необхідність у фінішній обробці Великі виробничі площі

		фотополімеризації	
--	--	-------------------	--

Найбільш поширені та відомі представники АВ є фотополімеризація в ванній (Vat Photopolymerization, VP), синтез на підкладці (Powder Bed Fusion, PBF) та екструзія матеріалу (Material Extrusion, ME).

VP SLA (Laser Stereolithography) – це технологія тривимірного друку в якому в ролі сировини виступає фото-полімер, котрий під дією лазерного променя твердіє в точці його фокусування та формує тверде тіло крок за кроком. На даний момент, основний недолік цієї технології являється вартість обладнання та чутливість фото-полімерів до ультрафіолетового випромінювання (Рис 1.1.1 – 1.1.2).

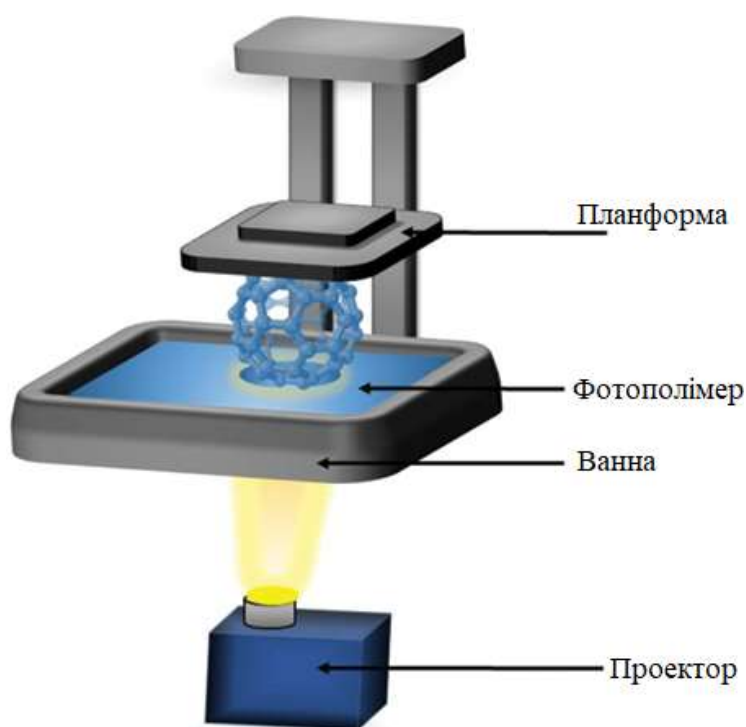


Рисунок 1.1.1. Принцип роботи SLA принтера



Рисунок 1.1.2. Приклади SLA друку

PBF SLS (Selective Laser Sintering) – дана технологія у більшості схожа на попередню, відмінність полягає в заміні фото-полімерів на пластиковий порошок, котрий під дією лазера спікається та формує структуру друкованої моделі. Також вони різняться тим, що за даної технології існує необхідність оновлювати шари порошку над вже готовими шарами деталі, що збільшує час на друк (Рис. 1.1.3 – 1.1.4). Основною перевагою даного методу над попереднім є висока міцність готового продукту. Але ця міцність забезпечується додатковим спіканням, що призводить до усадки деталі, котра може досягати 30% .

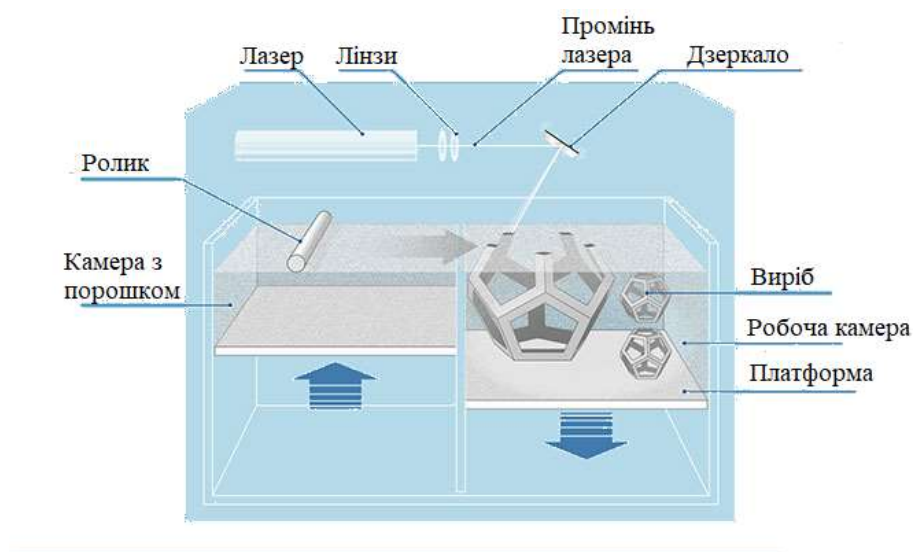


Рисунок 1.1.3. Принцип роботи SLS принтера



Рисунок 1.1.4. Приклад SLS друку (Нейлон)

ME FDM (Fused Deposition Modeling) – технологія, котра працює за принципом пошарового нанесення розплавленого пластику на контур деталі через сопло (Рис. 1.1.5 – 1.1.6). Дана технологія є найбільш поширеною по причині закінчення терміну дії патенту, що викликало хвилю створення нових проектів на основі даної технології. Не складно здогадатися, що основною перевагою принтерів, працюючих за цим принципом, є їх простота та низька вартість. Серед недоліків даної технології є мала точність позиціонування екструдера та розтікання матеріалу під час друку, слід не забувати й про усадку.

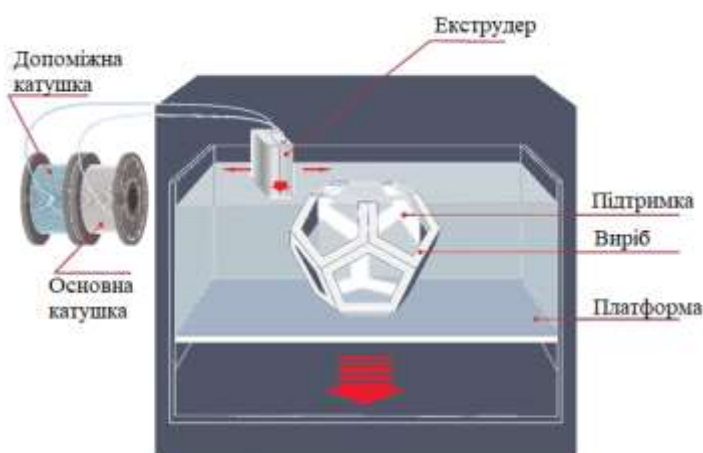


Рисунок 1.1.5. Принцип роботи FDM принтера



Рисунок 1.1.6. Приклад FDM друку

1.2. Матеріали для 3Д – друку

Для кожної з наведених в попередньому пункті технологій друку використовуються свої специфічні матеріали. Для SLA це рідкі фото-полімерні смоли, для SLS це різноманітні порошки, а для FDM це полімери по типу PLA та ABS.

Як зазначено вище для принтерів, що працюють по принципу лазерної стереолітографії, застосовуються рідкі фото-полімерні смоли. Це своєрідний матеріал, котрий змінює свої властивості під дією світла. Найчастіше реагують з ультрафіолетовим випромінюванням. Дані принтери використовують досить широкий спектр смол. На ринку можна знайти гнучкі і жорсткі, інженерні та декоративні смоли різних кольорів та відтінків. Але все ж асортимент не настільки широкий як для FDM друку, але саме SLA та затратні матеріали для даної технології займають друге місце на ринку.

Консистенція смол і час засвічення також варіюються, тому при виборі принтера варто враховувати і асортимент сумісних матеріалів.

Останнім аспектом, на який варто звертати увагу при виборі матеріалу, це його токсичність. Існують як досить токсичні варіанти, так і біологічно безпечні.

Вартість витратних матеріалів можна вважати Ахіллесовою п'ятою даної технології. Самі принтери вже досягають досить високих цінових рівнів, а що ж стосується недорогих фотополімерних смол, вони поки що досить мало поширені. Варто сподіватися, що поширення недорогих фотополімерних принтерів призведе до збільшення обсягів виробництва витратних матеріалів і зниження цін.

Щодо фізичних властивостей смол, то основними характеристиками для друку вважаються час засвічування шару, твердість та *усадка* (Табл. 1.2.1).

Таблиця 1.2.1 Порівняльна таблиця смол

Полімер	Час засвічування шару 0.05 мм, с	Твердість по Шору	Усадка, %
Harz abs Model	3,5 - 4	87 - 92	<1
Fun To Do Standart Blend	1,8	35	0,5
Fun To Do Industrial Blend	1,5	75	0,5
Fun To Do Castable Blend	2	73	0,5
UV Res M001	5	55 - 60	0,5
UV Res M111	8	75 - 80	0,03

Принтери що працюють за принципом селективного лазерного спікання, а саме за технологією SLS притаманні матеріали в порошковій формі. Відмінність

даних матеріалів від решти в тому, що SLS друк орієнтований на промислові цілі, за рахунок чого матеріали виготовляються відповідні. На сьогоднішній день доступний широкий асортимент порошкових сумішей. Серед яких нейлон, полістирол, кераміка та багато інших. Металеві порошки доступні в асортименті – сталь, алюміній, титан, кобальт та їх суміші. Враховуючи специфіку даної технології матеріали також діляться на ударостійкі, зносостійкі, жаростійкі на інші.

Слід зазначити що дана технологія забезпечує часткове спікання шарів, як наслідок після друку слідує термічна обробка.

Найбільш поширеним матеріалом для SLS являється поліамід 12 (PA12), також відомий як нейлон 12. На даний момент з'являється все більше матеріалів для даної технології, наприклад еластичні полімери, що носять назву TPE порошок і його аналоги. Решта матеріалів, таких як PA11 та PEEK, так само досить доступні, але не так широко використовуються (Табл. 1.2.2). Слід пам'ятати що дані матеріали у вигляді порошків можуть бути доповненими іншими добавками, такими як вуглецеві волокна, скловолокно або ж алюміній, для покращення фізико-механічних властивостей готового виробу. Матеріали доповнені добавками, зазвичай більш крихкі і мають більшу анізотропність.

Таблиця 1.2.2. Характеристики порошковий матеріалів

Матеріал	Характеристики
Поліамід 12 (PA 12)	Хороші механічні властивості Хороша хімічна стійкість Матова, шорстка поверхня
Поліамід 11 (PA 11)	Абсолютно ізотропна поведінка Висока еластичність

Алюмінієвий нейлон	Металевий зовнішній вигляд Висока жорсткість
Скляний нейлон (PA – GF)	Висока жорсткість Висока зносостійкість та теплостійкість Анізотропна поведінка
Нейлон з вуглецевим волокном (PA – FR)	Висока жорсткість Хороше співвідношення ваги до міцності Висока анізотропність

Що ж стосується FDM принтерів то вони повсюди. Полімерні пластики такі як PLA та ABS у вигляді шнура являються найбільш стандартними матеріалами для даної технології.

Полілактид (PLA) - один з найбільш широко використовуваних термопластиків, що обумовлюється відразу декількома факторами. Почнемо з того, що PLA відомий своєю екологічністю. Цей матеріал є полімером молочної кислоти, що робить PLA повністю біорозчинним матеріалом. Сировиною для виробництва полілактиду служать кукурудза і цукровий очерет. У той же час, екологічність полілактиду обумовлює його недовговічність. Пластик легко вбирає воду, що призводить до його розм'якшення. Як правило, моделі з PLA не призначаються для функціонального використання, а служать в якості дизайнерських моделей, сувенірів та іграшок. Серед небагатьох практичних промислових застосувань можна відзначити виробництво упаковки для харчових продуктів, контейнерів для лікарських препаратів і хірургічних ниток, а також використання в підшипниках, що

не несуть високу механічну навантаження (наприклад, в моделюванні), що можливо завдяки відмінному коефіцієнту ковзання матеріалу.

Одним з найбільш важливих факторів для застосування в 3D-друку є низька температура плавлення - всього 170 – 180 ° С, що сприяє відносно низькій витраті електроенергії і використання недорогих сопел з латуні й алюмінію. Як правило, екструзія проводиться при 160-170 ° С. У той же час, PLA досить повільно застигає (температура кристалізації складає близько 50 ° С), що слід враховувати при виборі 3D-принтера. Оптимальним варіантом є пристрій з корпусом відкритого типу, що підігрівається робочою платформою і, бажано, додатковими вентиляторами для охолодження свіжих шарів моделі.

PLA має низьку усадку, тобто втрати обсягу при охолодженні, що сприяє запобіганню деформацій. Проте, усадка має кумулятивний ефект при збільшенні габаритів друкованих моделей. В останньому випадку може знадобитися підігрів робочої платформи для рівномірного охолодження друкованих об'єктів.

Вартість PLA відносно невелика, що додає популярності цього матеріалу.

Акрилонітрилбутадієнстирол (ABS, АБС) - мабуть, найпопулярніший термопластик з використовуваних в 3D-друку, але не найпоширеніший. Таке протиріччя пояснюється певними труднощами технічного характеру, що виникають при друку ABS. Широке використовувати ABS обумовлюється тим що він володіє відмінними механічними властивостями, довговічністю і низькою вартістю. ABS-пластик в промислових кругах вже набуває широкого застосування: виробництво деталей автомобілів, корпусів різних пристроїв, контейнерів тощо.

ABS-пластик стійкий до вологи, кислот і масла, має досить високі показники термостійкості - від 90 ° С до 110 ° С. Деякі види матеріалу руйнуються під впливом прямого сонячного світла, що досить сильно обмежує застосування. Але ABS-пластик досить легко піддається фарбуванню, що дає можливість наносити захисні покриття та збільшувати строки служби готових виробів.

Незважаючи на відносно високу температуру кристалізації близько 100°C , ABS-пластик володіє невисокою температурою плавлення. З огляду на аморфність матеріалу, ABS не має точки плавлення, як такої, але прийнятною температурою для екструзії вважається 180°C , що на одному рівні з вищеописаним PLA. Більш низька градація температур між екструзією і кристалізацією сприяє швидшому застиганню ABS-пластика в порівнянні з PLA.

Головним мінусом ABS-пластика вважається його висока ступінь усадки при охолодженні - матеріал може втратити до 0,8% обсягу. Цей ефект може привести до значних деформацій моделі, закручування перших шарів і розтріскування. Для подолання цих явищ існує два основних рішення. По-перше, використання нагріваючих робочих платформ, що сприяють зниженню градієнта температур між нижніми і верхніми шарами моделі. По-друге, слід використовувати закриті корпуси з регулюванням температури робочої камери. Це дозволяє підтримувати температуру нанесених шарів на позначці трохи нижче порога кристалізації, знижуючи ступінь усадки. Остаточне остивання виробу проводиться після завершення друку.

У той час як при кімнатній температурі ABS не становить загрози здоров'ю, при нагріванні пластику виділяються пари акрилонітрилу - отруйного з'єднання, здатного викликати подразнення слизових оболонок і отруєння. Хоча обсяги виробленого акрилонітрата при друці незначні, рекомендується друкувати в добре провітрюваних приміщеннях або передбачити витяжку.
















Хороша розчинність ABS-пластика в ацетоні вельми корисна, тому що дозволяє виробляти великі моделі по частинах з наступним склеюванням, що значно розширює можливості недорогих настільних принтерів.

Окрім PLA та ABS пластиків існує ще багато інших зі своїми позитивними та негативними властивостями.

Існують, також, полімерні матеріали з домішками деревини, металів, вуглецевих волокон та безлічі інших матеріалів. Але не кожен принтер буде в змозі

друкувати тим чи іншим пластиком по причині обмеженості діапазону робочих температур в залежності від температури плавлення пластику (Табл. 1.2.3).

Таблиця 1.2.1. Фізичні властивості матеріалів для FDM друку

Філамент	Фізичні властивості				
	Температура, °C		Міцність	Гнучкість	Довговічність
	Екструдер	Стіл			
ABS	220-230	80-110			
PLA	180-200	60-80			
Полікарбонат	220-310	100-110			
Нейлон	240-260	60-80			
HIPS	210-230	110			
Вуглецеве волокно	195-220	45-55			
Дерево	200-230	90-110			
Метал	190-230	-			

Слід також зазначити що наявність домішок в пластику призводить до інтенсивного зношення сопла екструдера, що призводить до зміни його пропускної здатності та як результат не рівномірної подачі розплаву в зону друку. З даною проблемою справляються шляхом заміни звичайних наконечників на керамічні.

1.3. Розмірні ланцюги

Основним фактором, що визначає якість та довговічність роботи будь-якої машини являється взаємний зв'язок і правильне положення всіх вузлів та окремих деталей. З чого випливає, що для нормальної роботи машини чи іншого виробу, слід забезпечувати в конструкціях машин та механізмів певні розмірні норми, іншими словами, обмеження.

Під час технологічного опрацювання креслень в основному приходиться працювати з тими елементами конструкції, котрі пов'язані з уточненням лінійних розмірів, допусків та їх відхилень, встановлених, як правило, на основі аналізу

розмірних зв'язків. Таким чином на кресленику деталі всі розміри можуть бути вільними, а можуть бути і декілька уточнених, тих розмірів від яких залежить правильна робота деталі.

Кожен механізм чи вузол від конструкторської задумки до реалізації її в металі проходить як мінімум два етапи: перший етап складає роботу конструкторського відділу, котрий формує розмірну характеристику виробу; другий етап – це технологічний відділ, де відбувається встановлення розмірів, допусків та відхилень на всіх між операційних етапах виготовлення деталі.

Існує три види розмірного аналізу:

- Розмірний аналіз механізму;
- Розмірний аналіз деталі;
- Розмірний аналіз технологічного процесу (розмірне моделювання);

Розмірний аналіз дає змогу обґрунтовано назначати допуски та посадки для елементів машин та паралельно з тим економічно забезпечувати якість готової продукції.

Існує досить багато методів розрахунку розмірних ланцюгів. РД 50-635-87 [11] встановлює методи розрахунку розмірних ланцюгів з використанням різних методів досягнення точності замикаючої ланки, такі як:

- метод повної взаємозамінності;
- метод неповної взаємозамінності (імовірнісний метод);
- метод групової взаємозамінності (селективної зборки);
- метод підгонки; метод регулювання;

Дані методи володіють як перевагами так і недоліками. Їхня суть полягає у швидкому аналізі та отриманні результату, що є досить ефективним в польових умовах. Проте якщо брати до уваги гнучкість та час затрачений на виконання аналізу, дані методи поступаються методам автоматизованого розмірного аналізу.

З розвитком технологій, завдання проектування деталей і вузлів переходять на обчислювальну техніку. Автоматизація проектування і створення CAD-програм для розрахунку розмірних ланцюгів дозволяють скоротити терміни підготовки виробництва до випуску нової продукції, зменшити витрати і підвищити якість проектних робіт.

Для управління допусками розмірів потрібен перехід від концептуальних функціональних інтерфейсів і необхідної довідкової інформації до точних критеріїв деталей, процесів монтажу і перевірки виробів.

Програмний комплекс SolidWorks пропонує виконання розмірного аналізу в 3D-моделях збірок з використанням спеціалізованих додатків TolAnalyst і CETOL 6 Sigma.

Розмірний аналіз з використанням програми TolAnalyst дозволяє визначити вплив не тільки допусків розмірів компонентів збірки, але і порядок їх монтажу на основі точності характеристики останнього розміру (Рис. 1.3.1). Для проведення аналізу розмірних допусків необхідно, щоб всі актуальні розміри і допуски в моделі були призначені за допомогою інструментів DimXpert.

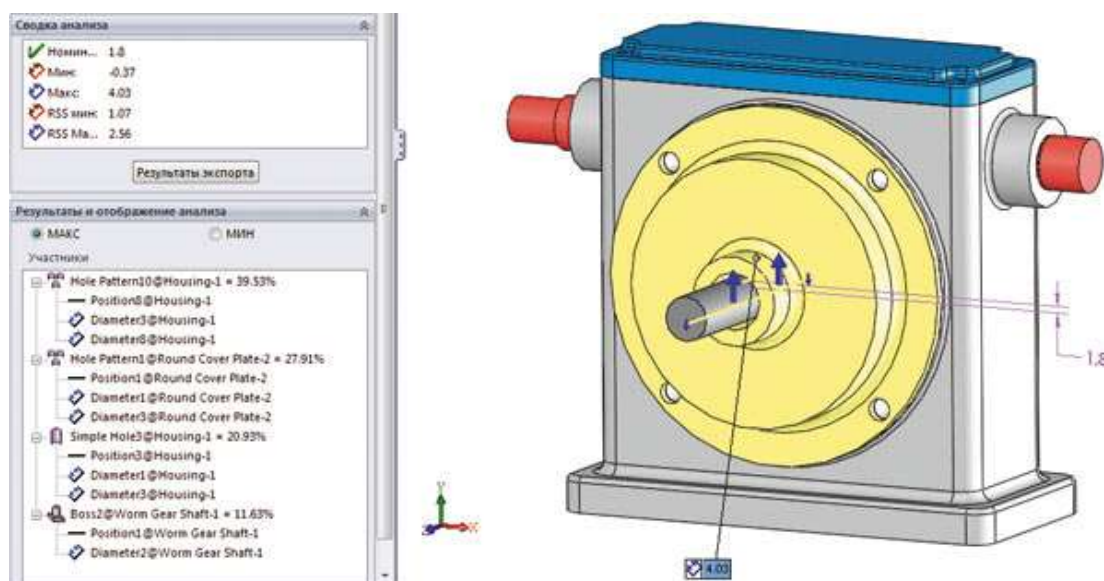


Рисунок 1.3.1. Результаты розрахунку допусків в ToolAnalyst

В результаті кожного дослідження для останнього розміру стають відомі:

- номінальне значення;
- мінімальний і максимальний допуски (найгірший випадок);
- мінімальний і максимальний RSS-допуск;
- контрибуція - відносна ступінь участі елемента в розмірній ланцюга і його вплив на замикаючу ланка (в%).

За результатами розрахунку формується звіт у форматі Excel, де інформація доступна для подальшої обробки (Рис. 1.3.2).

Измерение TolAnalyst	(мм)			
Номинальное значение	1,8			
Минимальное значение	-0,37			
Максимальное значение	4,03			
Минимальный RSS	1,07			
Максимальный RSS	2,56			
Минимум участников				
Элемент	Процент			
Hole Pattern10@Housing-1	36,96%			
	Размеры	Номинальное значение	Тип	Допуск 1
	Diameter3@Housing-1	80	Симметричный	0,1
	Diameter8@Housing-1	6,25	Симметричный	0,25
	Допуски отклонения формы и расположения поверхности	Тип	Допуск 1	Допуск 2
	Position8@Housing-1	Расположение	0,5	
Hole Pattern1@Round Cover Plate-2	26,09%			
	Размеры	Номинальное значение	Тип	Допуск 1
	Diameter1@Round Cover Plate-2	16,1	Симметричный	0,05
	Diameter3@Round Cover Plate-2	6,25	Симметричный	0,25
	Допуски отклонения формы и расположения поверхности	Тип	Допуск 1	Допуск 2
	Position1@Round Cover Plate-2	Расположение	0,5	

Рисунок 1.3.2. Результат розрахунку ToolAnalyst

Додаток CETOL 6 Sigma є потужним інструментом аналізу розмірних ланцюгів, інтерфейс якого повністю інтегрований в SolidWorks (Рис. 1.3.2). В його основі лежить імовірнісний метод вирішення задачі знаходження номінального значення і величини допуску замикаючої ланки розмірного ланцюга при відомих номінальних значеннях і допусках складових ланок, а також здійснюється побудова розподілу ймовірності для останнього.

Точність розмірного аналізу в CETOL 6 Sigma забезпечується за рахунок:

- зручних інструментальних засобів і процесів оптимізації допусків;
- точного розуміння того, як особливості допусків і виробничі зміни впливають на якість продукту;

- високого рівня інтегрованого рішення з CAD-системою;
- виправлення помилок моделювання для проведення надійного аналізу допусків в проектах.

CETOL 6 Sigma складається з двох основних компонентів: модуля моделювання і модуля аналізу.

У модулі моделювання реалізована розширена інтеграція з CAD-моделлю. Операції проводяться безпосередньо з CAD-геометрією, все розмірні дані по допускам CETOL зберігаються в файлах деталей і зборок. Як тільки зразкові дані визначаються для окремого компонента, вони в подальшому можуть багаторазово застосовуватися, якщо деталь або складання використовуються в інших збірках. Дані CETOL можуть бути оновлені автоматично, щоб врахувати всі зміни номінальної геометрії CAD-моделі. Розміри ланцюга і граничні умови по монтажу визначаються між гранями і крайками CAD-моделі, що дозволяє вимірювати зазор (натяг) між поверхнями за фактичним мінімальному відстані.

Кінематична схема збірки визначається за допомогою граничних умов з використанням адаптивних кінематичних з'єднань. Такий функціонал дає CETOL можливість точно характеризувати поведінку складних збірок через зручний інтерфейс. CETOL застосуємо для аналізу всіх типів кінематичних збірок, а особливо сильна його сторона - аналіз механізмів (Рис. 1.3.3).

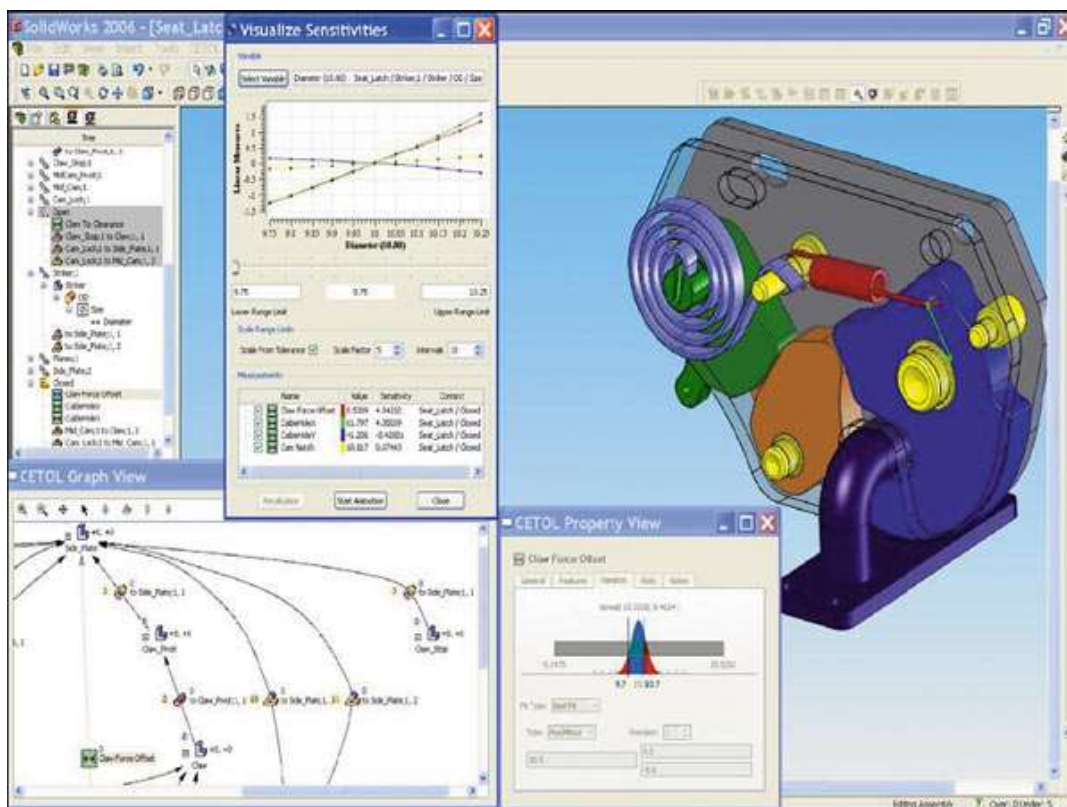


Рисунок 1.3.3. Діалогове вікно під час аналізу CETOL

Також до складу CETOL входить ітераційний пристрій, що знаходить рішення замкнутого розмірного ланцюга для визначення місця розташування та орієнтації кожного компонента в збірці.

Модуль аналізу CETOL 6 Sigma використовує технологію аналізу, засновану на обчисленні приватних похідних (чутливості) кожного вимірювання по кожному напрямку. Головні переваги такого аналізу:

- Обчислюються чутливість і контрибуція для кожного розміру в ланцюзі. Чутливість і контрибуція можуть бути використані для виявлення елементів, критично впливають на якість збірки. З їх допомогою можлива ідентифікація потенційного зменшення виробничих витрат - розміри з низькою чутливістю і внеском дають можливість здешевлення виробничих процесів;
- Чутливість розміру дозволяє миттєво оцінити будь-які конструктивні і виробничі зміни в CAD-моделі. Зміни в значеннях допусків розмірів,

показниках якості деталей або типі статистичного розподілу відразу приводять до відновлення результатів аналізу.

CETOL дозволяє розраховувати розмірні ланцюги як статистичним методом (Statistical Analysis), так і методом «найгірший випадок» (Worst-Case Analysis), ґрунтуючись на розрахункових значеннях чутливості.

Результати аналізу в CETOL 6 Sigma представляються в звіті (Рис.1.3.4 – 1.3.6), який містить різноманітну інформації про модель:

- в діаграмі статистичного розподілу вказані верхню і нижню межі, цільове значення замикаючої ланки; тип розподілу і його моменти; діаграма розподілу;
- в діаграмі розподілу для «найгіршого випадку» наведені верхній і нижній межі, цільове значення замикаючої ланки; мінімальне і максимальне значення розміру; діаграма розподілу;
- діаграма чутливості використовується для ідентифікації розмірів і допусків, що надають критичний вплив на якість продукту. Позитивна чутливість означає, що збільшення значення змінної збільшує значення замикаючої ланки, а негативна - що збільшення значення змінної зменшує значення ланки;
- діаграма контрибуції висловлює відносну ступінь участі елемента в розмірної ланцюга і його вплив на замикаючу ланка (в%).

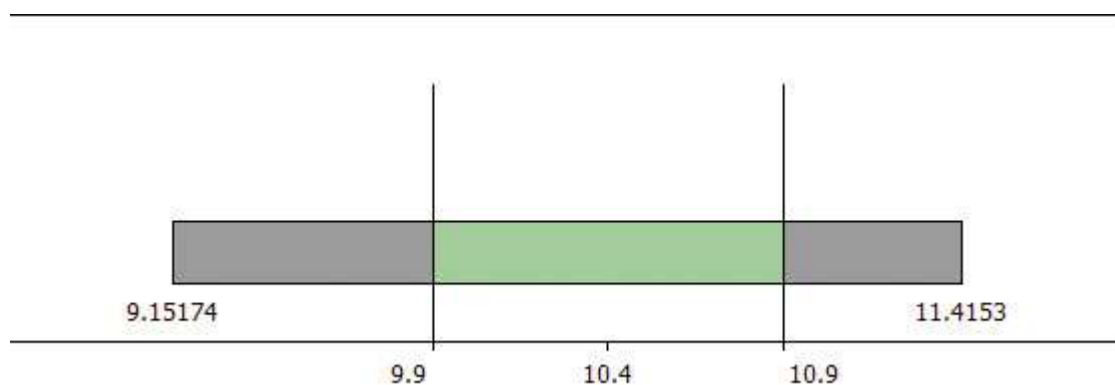


Рисунок 1.3.4. Діаграма розподілу «Найгіршого випадку»

Variable:	Linear Sensitivity: (Top 15 variables)	
CAM;1 / Large OD / Size / Radius	1.66257223	
HOUSING;1 / Cam Pin Hole / to A B C / TX	1.66256301	
ROCKER;1 / Push Rod Contact Surface / Size / Radius	1.00000118	
HOUSING;1 / Top / to B / TY	-1.00000000	
PUSH_ROD;1 / End / to Contact Tip / TY	1.00000000	
ROCKER;1 / Push Rod Contact Surface / to Bottom / TY	-0.99999958	
CAM_PIN;1 / Shaft / Size / Diameter	0.83128150	
HOUSING;1 / Cam Pin Hole / Size / Diameter	-0.83128150	
ROCKER;1 / Bottom / to Hole / TY	0.66257265	
HOUSING;1 / Rocker Pin Hole / to A B C / TX	-0.66256301	
HOUSING;1 / Rocker Pin Hole / Size / Diameter	-0.33128150	
ROCKER_PIN;1 / Shaft / Size / Diameter	0.33128150	
HOUSING;1 / Cam Pin Hole / to A B C / TY	0.00553573	
HOUSING;1 / Rocker Pin Hole / to A B C / TY	-0.00399709	
ROCKER;1 / Push Rod Contact Surface / to Ref Plane / TX	-0.00179098	

Рисунок 1.3.5. Діаграма чутливості

Variable:	Contribution: (>= 1%)	Sensitivity:	Parent Tolerance:
CAM;1 / Large OD / Size / Radius	56.71%	1.66257223 mm/mm	15.0 +/-0.2
ROCKER;1 / Push Rod Contact Surface / Size / Radius	20.52%	1.00000118 mm/mm	12.0 +/-0.2
HOUSING;1 / Top / to B / TY	5.13%	-1.00000000 mm/mm	100.0 +/-0.1
PUSH_ROD;1 / End / to Contact Tip / TY	5.13%	1.00000000 mm/mm	55.0 +/-0.1
ROCKER;1 / Push Rod Contact Surface / to Bottom / TY	5.13%	-0.99999958 mm/mm	1.6 +/-0.1
HOUSING;1 / Cam Pin Hole / to A B C / TX	2.66%	1.66256301 mm/mm	POS Ø 0.1 A B C
ROCKER;1 / Bottom / to Hole / TY	2.25%	0.66257265 mm/mm	5.0 +/-0.1

Рисунок 1.3.6. Діаграма контрибуції

1.4. Висновки

Забезпечення точності в галузі машинобудування як розмірної так і точності розташування, являється головною задачею. Таке поняття, як точність впливає на якість, працездатність та експлуатаційні характеристики готового виробу чи то частини машини на пряму. Як приклад можна навести двигуни внутрішнього згорання серійних автомобілів та болідів «Формули 1». Різниця між силовими агрегатами полягає в точності підгонки складових двигуна один до одного. Але збільшення точності збільшує і собівартість виготовлення, тут варто зберігати баланс.

«Формула 1» – являється піонером у впровадженні інновацій в автомобільній галузі - кардинально перебудувавши проектування і виробництво, домоглася скорочення термінів виготовлення, вартості і полегшення деталей гоночних автомобілів.

Партнер команди F1 Williams по 3D-друку (виробник принтерів EOS) зазначає:

«При традиционном производстве команда ждала новые детали долгие месяцы, сейчас это занимает несколько часов. Williams сейчас печатает больше 2000 деталей в месяц, и при этом получает значительную экономию стоимости».

За рахунок відтворення складних форм дизайну, 3D-принтер може зменшити обсяг використовуваного матеріалу і завдяки цьому істотно полегшити конструкцію, що є критичним фактором для ряду галузей. Наприклад, зекономлений кілограм для «Формули 1» може означати різницю між перемогою або поразкою в гонці, для авіакосмічної індустрії полегшення деталей виражається в економії витрати палива, тоді як для стаціонарного заводського обладнання зекономлена маса буде не так важлива. В традиційному виробництві видалення матеріалу для полегшення ваги здорожує виробництво, в зв'язку з додатковою роботою та витратами на обробку різанням. Вищенаведені приклади, ще раз чітко підкреслюють, що розвиток 3D-друку має перспективи в подальшому його вдосконаленні. Використання такої технології може в певній мірі полегшити і покращити виробництво тих чи інших

деталей, що в свою чергу позитивно вплине на загальну якість кінцевого продукту. Але слід відмежовувати для яких саме галузей це буде доречним. Тому зрештою, можна стверджувати, що це технологія майбутнього.

Адаптивні технології мають надзвичайний потенціал для розвитку та впровадження в промисловість завдяки своїй гнучкості та відносно малій вартості, що в свою чергу здатне перевернути погляд на виробництво в цілому. Проте, не варто забувати, що адаптивні технології, на даному етапі свого розвитку, не є досконалими. Основні проблеми полягають в обмеженості матеріалу та забезпеченні відповідної точності на етапі друку. Та це не є недоліками, що не підлягають вирішенню. Якщо говорити за матеріали то, тут все ясно – з кожним днем їх асортимент зростає та поповнюється новими фізико-хімічними властивостями. Адже знаючи перспективність даної технології, робота над вдосконаленням матеріальної бази лише піддає інтересу для пошуку нових комбінацій елементів та знаходженню незвичайних рішень. Наприклад, компанія-виробник обладнання для 3Д друку - Formlabs представила матеріал - White Resin («Біла Смола»). Його головна особливість в тому, що матеріал має насичено білий колір та є непрозорим, а також має виняткову гладкість поверхні готового надрукованого об'єкта. Ще одним незвичним, але не менш практичним є впровадження використання титанового порошку для 3D-друку автозапчастин. Таке рішення є дешевшим, в порівнянні з пластиком, але при цьому може використовуватись при виготовлення обладнання і машин аерокосмічної, оборонної та автомобільної промисловості.

А от щодо точності та повторюваності, то це вже завдання іншого рівня. Але при цьому воно теж підлягає вдосконаленню.

Під час проведення розмірного аналізу враховується допуск, у випадку ж друкованої деталі не можна гарантувати чи скорегувати розмір під час друку. Це ставить перед нами задачу знайти, описати процес друкування. Проблеми, які з'являються по ходу даного процесу стимулюють зацікавлених в цій галузі людей знаходити альтернативні рішення та розвиватись. Цим самим відбувається

покращення науково-технічного прогресу, що в результаті полегшує виробництво та при цьому вдосконалює якість та точність виготовлення виробу.

Підсумовуючи вищесказане, можна із впевненістю говорити про високий рівень перспективності розвитку адаптивних технологій та їх впровадження в масове виробництво.

РОЗДІЛ 2

2.1. Висування експериментальної гіпотези

В ході освоєння технології 3Д-друку було виявлено низку спірних питань. Деякі виокремлені проблеми пов'язані із забезпеченням точності друкованих моделей, призначених для подальшої збірки. А як відомо, дана характеристика є критично важливою при виготовленні деталей [12]. Очевидним було, що на точність деталей впливає усадка, розтікання та накладання сусідніх шарів пластику під час друку, котрі були пов'язані з різними режимами друку (Рис. 2.1.1).

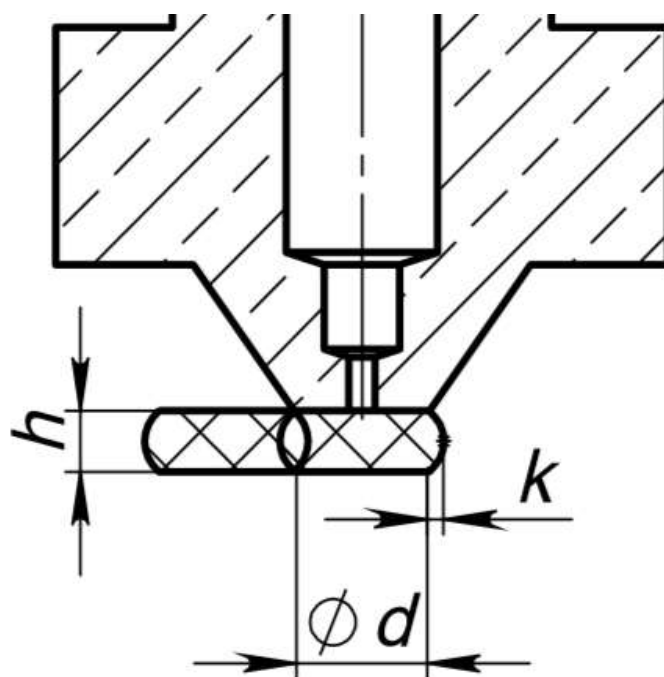


Рисунок 2.1.1 Ескіз накладання друкованих шарів

В зв'язку з тим, що в процесі виготовлення елементів за допомогою 3D – друку відбувається розсіяння поля допуску розмірів деталей, з'являється проблема того, щоб отримати стабільні номінальні значення розмірів. І в процесі виготовлення це стає реальною дилемою. Але для того, щоб знайти правильне вирішення цього питання необхідно створити емпіричну модель.

Слід зауважити, що в ході експлуатації 3Д-принтерів не можна забувати про такі фактори як амортизацію та не рівномірне зношування лінійних підшипників,

привідних ременів та направляючих. Все тому, що ці фактори в свою чергу вносять власні корективи в емпіричну модель, що в результаті може вплинути на кінцеві показники та розміри деталі. Тому амортизація та показник зношування потребують своїх поправочних коефіцієнтів, для підвищення точності готового виробу.

Результати наукового дослідження можуть бути використані у процесі покращення якості друкованих моделей за рахунок корекції розмірів трьох-мірної моделі деталі, тим самим скорочення часу на підготовку. Оскільки методика розроблена в ході роботи буде відрізнятися лише матеріалом, а саме його характеристиками, то вона може бути використана для корекції розмірів друку як металом так і порошковими матеріалами.

На розмірну точність друкованих деталей впливає безліч факторів таких як висота шару (h , мм), швидкість друку (V , мм/с), кількість ліній стінки (n), усадка та решта. В ході даної роботи буде розглянуто вплив лише трьох (h , V , n), термічне розширення та наступна усадка матеріалу не розглядається оскільки за її впливу складно адекватно оцінити вплив решти факторів.

Для виключення усадки зі списку факторів, що впливають на процес друку слід розглянути суть усадки (Рис. 2.1.2).

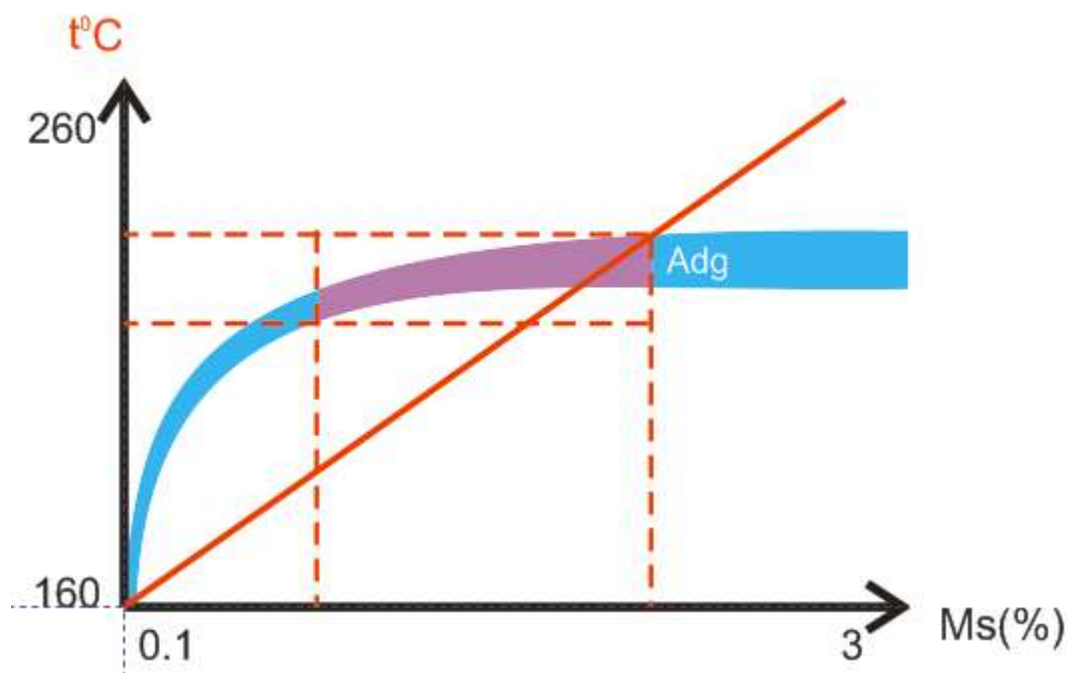


Рисунок 2.1.2. Залежність усадки від температури друку

На графіку наочно показано зростання адгезії з ростом температури (t) і графік термічного розширення / наступної усадки (M_s - molding shrinkage).

Повертаючись до розширення полімерів, слід звернути увагу на те, що чим більшому термічному впливу був підданий пластик, тим більшою буде його подальша усадка після охолодження. Як висновок можна сказати, що друкуючи зі сталою температурою можна мінімізувати вплив усадки на подальші результати.

2.2. Планування експерименту

В якості представника досить поширеного типорозміру обладнання використовувався 3D-принтер Prusa I3 Steel (Рис. 2.2.1). Паспортні технічні характеристики які нас цікавлять це можливість друку ABS, PLA пластиками та максимально можлива швидкість, котра становить 140 мм/с. [2] .

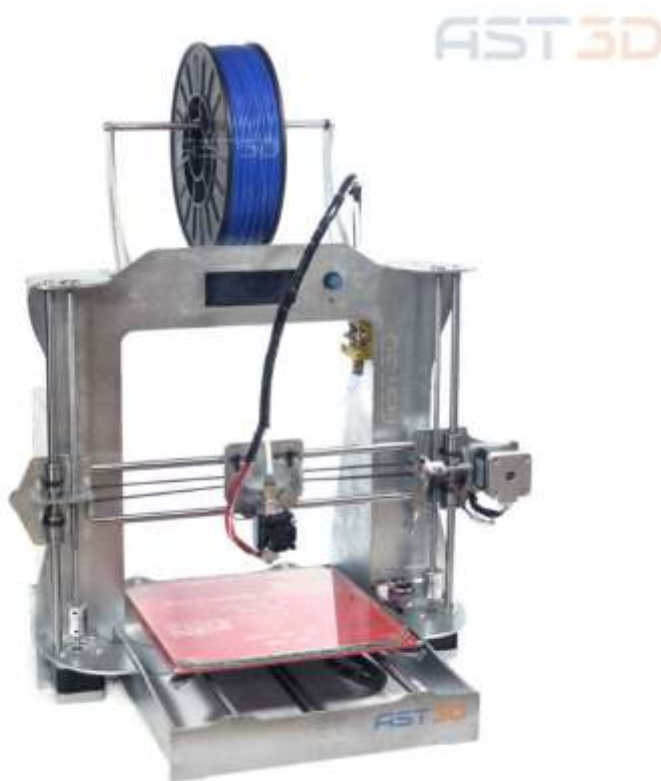


Рисунок 2.2.1 3D-принтер Prusa I3 Steel

В якості вимірювального пристрою використовувався мікрометр МК 0-25 мм. СССР (Рис. 2.2.2), котрий є універсальним інструментом, призначеним для вимірювання лінійних розмірів в області малих розмірів з низькою похибкою від 2 мкм до 50 мкм в залежності від вимірюваних діапазонів і класу точності, принциповим механізмом якого є мікро-пара гвинт-гайка.



Рисунок 2.2.2 Мікрометр МК 0-25 СССР

Першим кроком планування експерименту є план та опис факторів впливу. В нашому випадку це три фактори висота шару (h , мм), швидкість друку (V , мм/с), кількість ліній стінки (n).

Вище згадані фактори змінюються від найменшого значення до найбільшого в певним кроком. Задаємо найменше, найбільше та крок зміни у вказаній послідовності (Табл. 2.2.1).

Таблица 2.2.1 Опис факторів експерименту

Фактори	h , мм	$V_{пт}$, мм/хв	псл, шт.
Тип	К	К	К
Параметри	0,1	30	2
	0,25	60	6
	0,05	10	2

Для проведення досліджень вибрано робастний план на основі рівномірно розподілених в багатовимірному просторі псевдовипадкових ЛП чисел (Табл.2.2.2). Такий вибір ґрунтується на двох (із багатьох) перевагах цього виду планів: можливість їх побудови без втрати попередніх досліджень і їх властивість бути одночасно планами для пошуку оптимальних умов [3, 4]. На базі псевдовипадкових чисел формується робоча матриця (Табл. 2.2.3).

Таблиця 2.2.2. Матриця плану експерименту

Матриця плану експерименту			
№ експ.	X 1	X 2	X 3
1	0,5	0,5	0,5
2	0,25	0,75	0,25
3	0,75	0,25	0,75
4	0,125	0,625	0,875
5	0,625	0,125	0,375
6	0,375	0,375	0,625
7	0,875	0,875	0,125
8	0,0625	0,9375	0,6875

Таблиця 2.2.3. Робоча матриця експерименту

Робоча матриця			
№ експ.	X 1	X 2	X 3
3	0,2	30	6
7	0,2	60	2
1	0,15	40	4
5	0,15	30	4
6	0,15	40	4
2	0,1	50	2
4	0,1	50	6
8	0,1	60	6

2.3. Підготовка експерименту

Для проведення експерименту було розроблено дослідний зразок. Ним став куб з гранями 10мм. Для зручності та відповідності вимірів осям 3Д-принтера на верхній грані в нульовій точці була передбачена впадина (Рис. 2.3.1).

Для друку зразків використовувався пластик PLA(Monofilament). Даний пластик в повній мірі задовольняє як можливості принтера, так і умови експерименту.

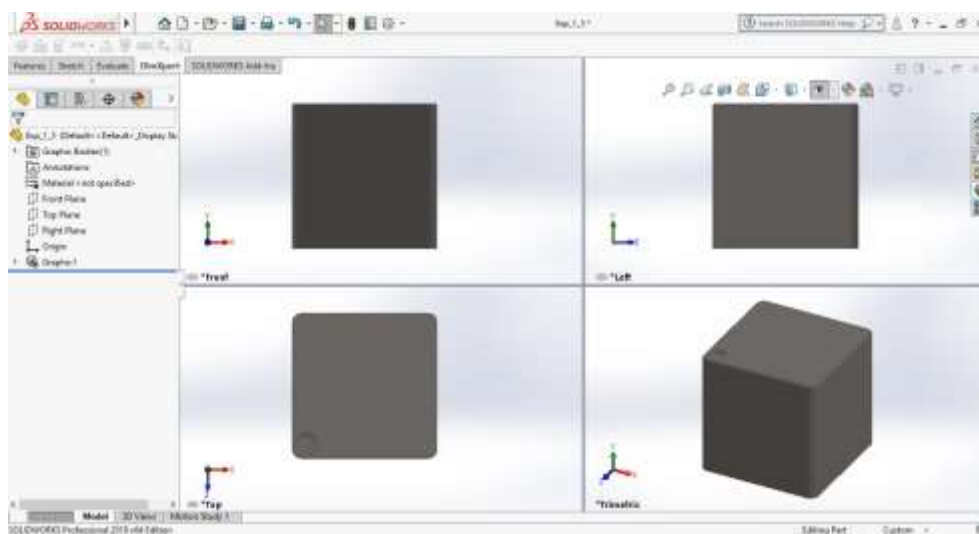


Рисунок 2.3.1. 3Д-модель дослідного зразка

Формування керуючої програми для 3Д-принтера було проведено в програмі CURA 4.6 (Рис 2.3.2). Відповідно до технічних умов вказаних на робочих креслениках дослідного зразку (Додаток 1) були задані необхідні параметри друку, такі як товщина шару пластика (0.2 мм), швидкість друку (50мм/с) та кількість стінок (4 шт.).

Було прийнято рішення друкувати зразок для перевірки не за рекомендованими параметрами друку, оскільки висота шару 0.2 мм є «стандартною» для сопла екструдера з діаметром 0.4 мм. Тому оптимально перевірити правильність роботи моделі саме на таких параметрах друку.

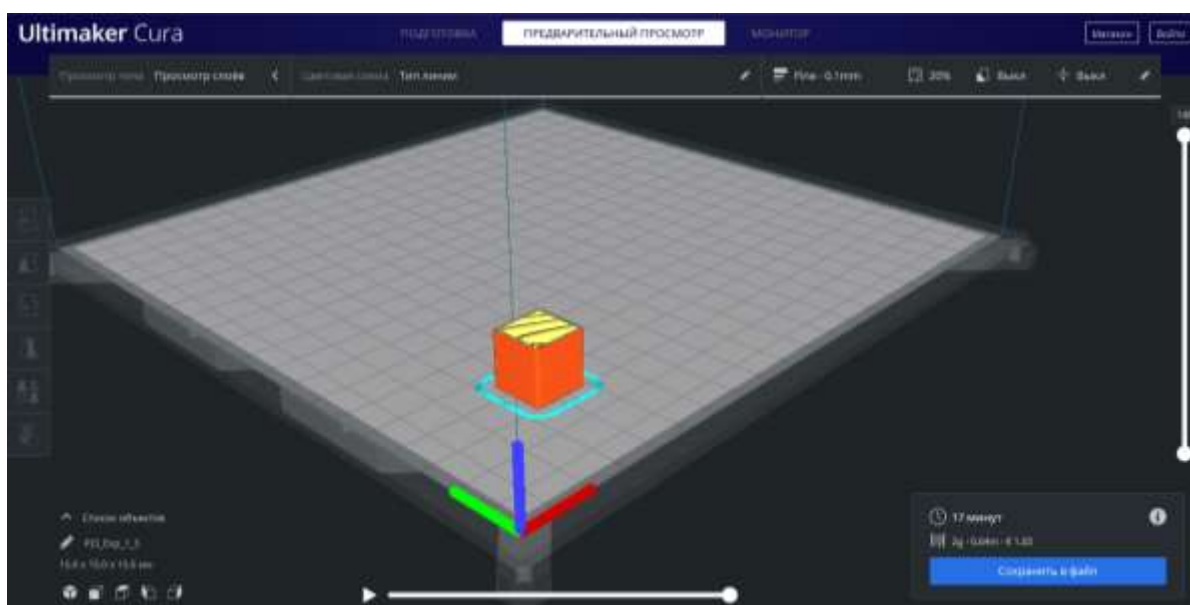


Рисунок 2.3.2 Діалогове вікно CURA 4.6

На рисунку 2.3.2 можна підмітити, що мітка на моделі (впадина) співпадає з початком системи координат. Таким чином виключається можливість сплутати грані куба під час вимірювань, та забезпечити правильність проведення аналізу даних.

2.4. Проведення експерименту

Час виготовлення одного дослідного зразку склав 3-4 хвилин. В цілому було затрачено 1 годину реального часу на виготовлення восьми зразків без врахування затрат на підготовку та часу на друк пробних варіантів.

Собівартість виготовлення одного зразку склала 2 гривні. Собівартість без урахувань на затрачений час та «умовну» амортизацію склала 16 гривень.

Під час роботи кожен зі зразків був пронумерований та оброзмірений (Табл. 2.4.1), нумерація відповідала порядковому номеру в робочій матриці. Таким чином ми мали змогу контролювати занесення даних відповідно до параметрів друкованих зразків.

Таблиця 2.4.1. Робоча матриця і результати експериментів

№ експ.	Робоча матриця			Результати експериментів		
	h	n	V	Δk_x	Δk_y	Δk_z
1	0,2	6	30	0,01	-0,04	-0,08
2	0,2	2	60	0,02	0,01	0,07
3	0,15	4	40	0,02	-0,01	0,08
4	0,15	4	30	0,02	-0,02	0,06
5	0,15	4	40	-0,05	-0,11	0,16
6	0,1	2	50	0,01	-0,07	0,13
7	0,1	6	50	-0,01	-0,09	0,14
8	0,1	6	60	0,01	-0,07	0,13

2.5. Статистична обробка експериментальних даних

Побудова моделей виконувалась в режимі автоматичного вибору структури за допомогою програмного засобу ПРИАМ (планування, регресія і аналіз моделей) [2]. Для забезпечення обчислювальної стійкості виконана ортогоналізація і нормування вихідної матриці (7 головних ефектів), а також побудовані подвійні і потрійні взаємодії (всього 28).

В результаті побудовані наступні моделі [12]:

$$Y_{\Delta kx} = 0,0173102 + 0,0461442x_1 + 0,0360033x_2 - 0,0129006x_3 - 0,0100195z_1x_3 + 0,0111828x_1u_3;$$

$$Y_{\Delta ky} = -0,0383168 + 0,0252042x_1 - 0,0366284x_3 + 0,0166383u_3 - 0,0220537x_2u_3;$$

$$Y_{\Delta kz} = 0,0661717 - 0,112562x_1 - 0,0231297x_3 + 0,0119543x_2u_3,$$

де: $x_1 = 17,7778 \cdot (X_1 - 0,14375)$; $z_1 = 2,05664 \cdot (x_1^2 - 0,153846 \cdot x_1 - 0,481482)$;

$x_2 = 0,444444 \cdot (X_2 - 4,25)$; $x_3 = 0,0666667 \cdot (X_3 - 45)$; $u_3 = 3,75 \cdot (x_3^3 - 0,911111 \cdot x_3)$.

Моделі адекватні, інформативні, структурно і обчислювально стійкі (Табл. 2.5.1).

Таблиця 2.5.1 Статистичні характеристики моделей

Характеристика	Назва	Δkx	Δky	Δkz
Інформативність	Множинний коефіцієнт кореляції (R)	0,999119	0,98356	0,998065
	Розрахункове значення критерію Фішера для перевірки значимості R (F_R)	226,64	22,25	343,56
	Критичне значення критерію Фішера для перевірки	19,30	9,12	6,59

	значимості $R (F_{кр})$			
	Степені свободи (v_1, v_2)	5, 2	4, 3	3, 4
	Частка розсіяння, яка пояснюється моделлю (R^2)	0,998238	0,96739	0,996134
	Критерій Бокса- Веца (γ)	3	1	6
	Гіпотеза про значимість множинного коефіцієнта кореляції	приймається	приймається	приймається
	Рівень інформативності	добрий	низький	Дуже високий
Адекватність	Дисперсія залишкова ($S^2_{ад}$)	$7,826 \cdot 10^{-6}$	0,000182468	$4,223 \cdot 10^{-5}$
	Дисперсія відтворюваності ($S^2_{відт}$)	$1,056 \cdot 10^{-7}$	$5,625 \cdot 10^{-7}$	$1,823 \cdot 10^{-6}$
	Розрахункове значення критерію Фішера для перевірки адекватності ($F_{ад}$)	255,34	13,27	160,12
	Критичне значення	19,30	9,12	3,40

	критерію Фішера для перевірки адекватності ($F_{кр}$)			
	Степені свободи (v_1, v_2)	5, 2	4, 3	3, 4
	Гіпотеза про адекватність	приймається	приймається	приймається
Точність	Середня точність опису даних в процентах відхилення (%)	7,42	38,05	7,39
	Середня абсолютна похибка апроксимації (Δ)	0,00127441	0,00631272	0,00386316
Стійкість	COND (число обумовленості)	2,20612	1,30743	1
	висновок	висока	висока	ідеальна
	Частка пояснення сумнівними регресорами (%)	0	0	0
	висновок	ідеальна	ідеальна	ідеальна
Рівень значущості	α	0,05		

Моделі мають високі статистичні характеристики. Домінуючими є лінійні залежності, що видно, наприклад, з відповідних характеристик для однієї з моделей (див. Рис. 2.5.1).

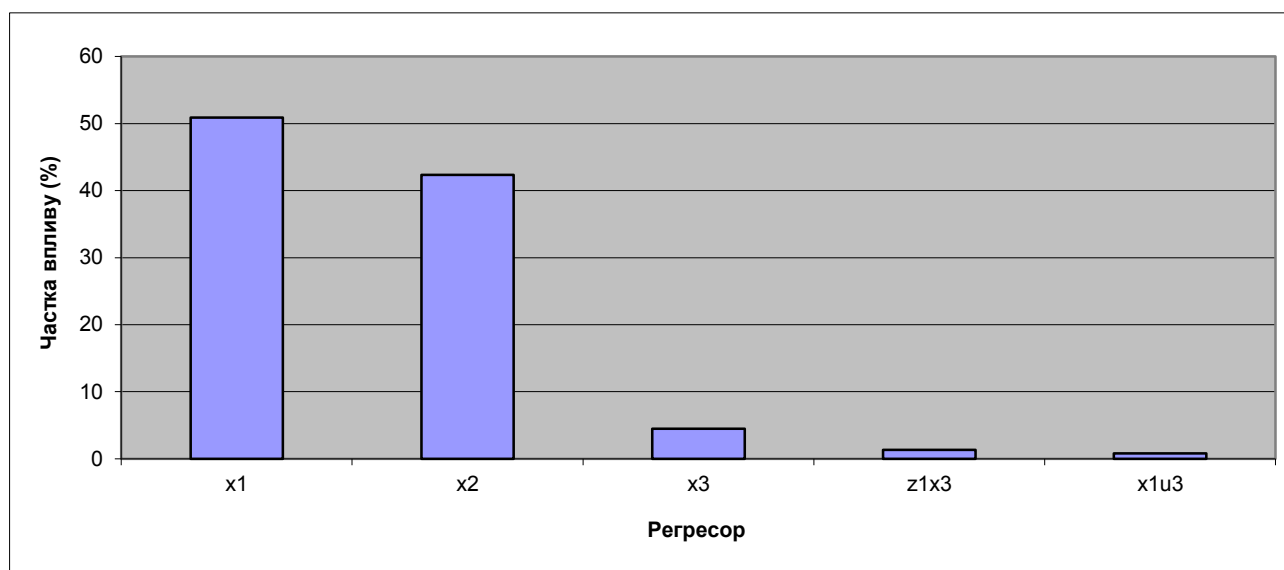


Рисунок 2.5.1. Розподіл сили впливу регресорів на відгук для моделі Δkx

Таку ж картину (незначна нелінійність) показують маргінальні поверхні відгуку для моделі Δkx (Рис. 2.5.2, 2.5.3) і Δky (Рис. 2.5.4). Незначна нелінійність являється причиною впливу факторів про які говорилося раніше, а саме зношеність лінійних підшипників та розтягнутість привідних ремнів. Ці фактори впливу не були розглянуті, оскільки вони являються індивідуальними для кожного принтера. Їх можна оцінювати як причини постійних похибок.

Інші поверхні або являють собою площини, або ж аналогічні приведеним.

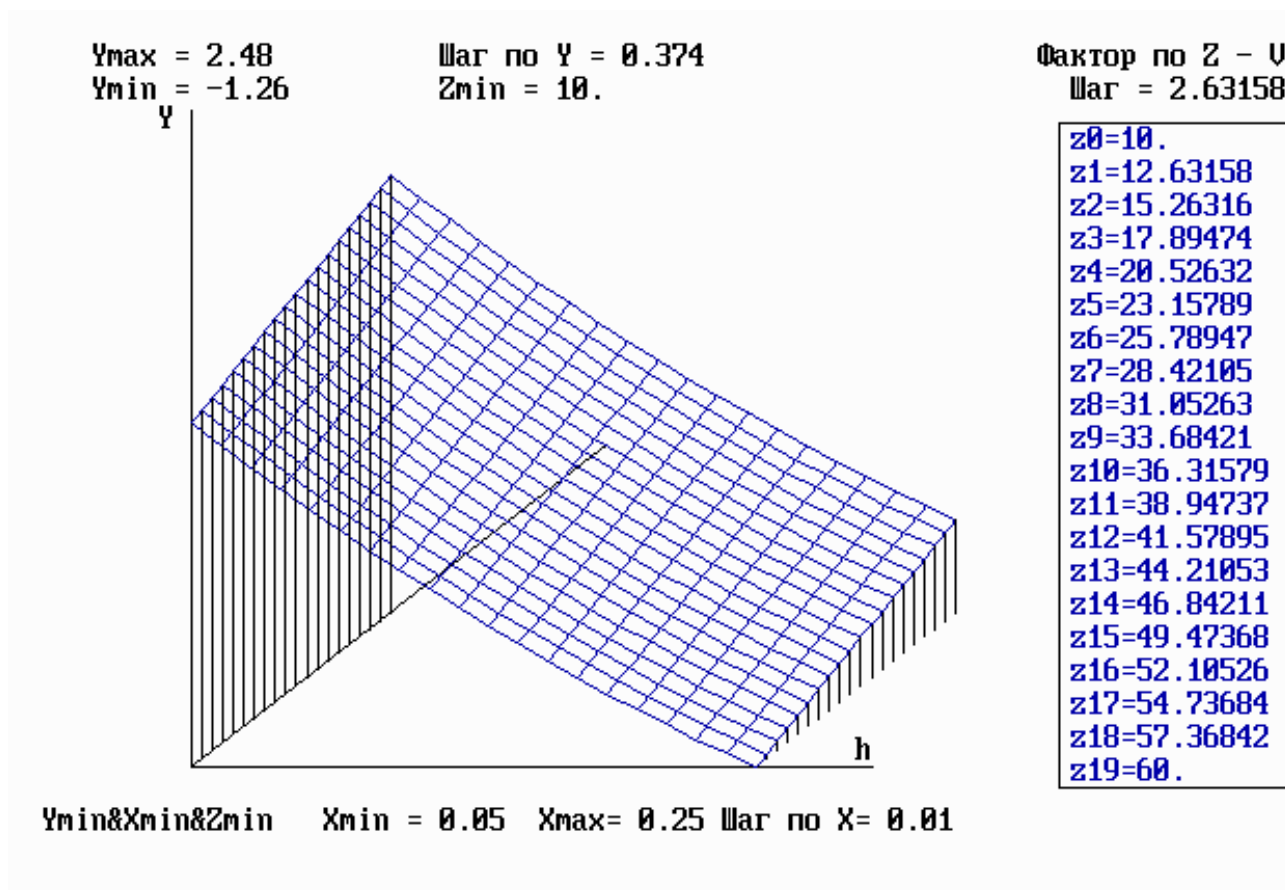


Рисунок 2.5.2. Маргінальна поверхня відгуку для Δk_x (при $n = 2$)

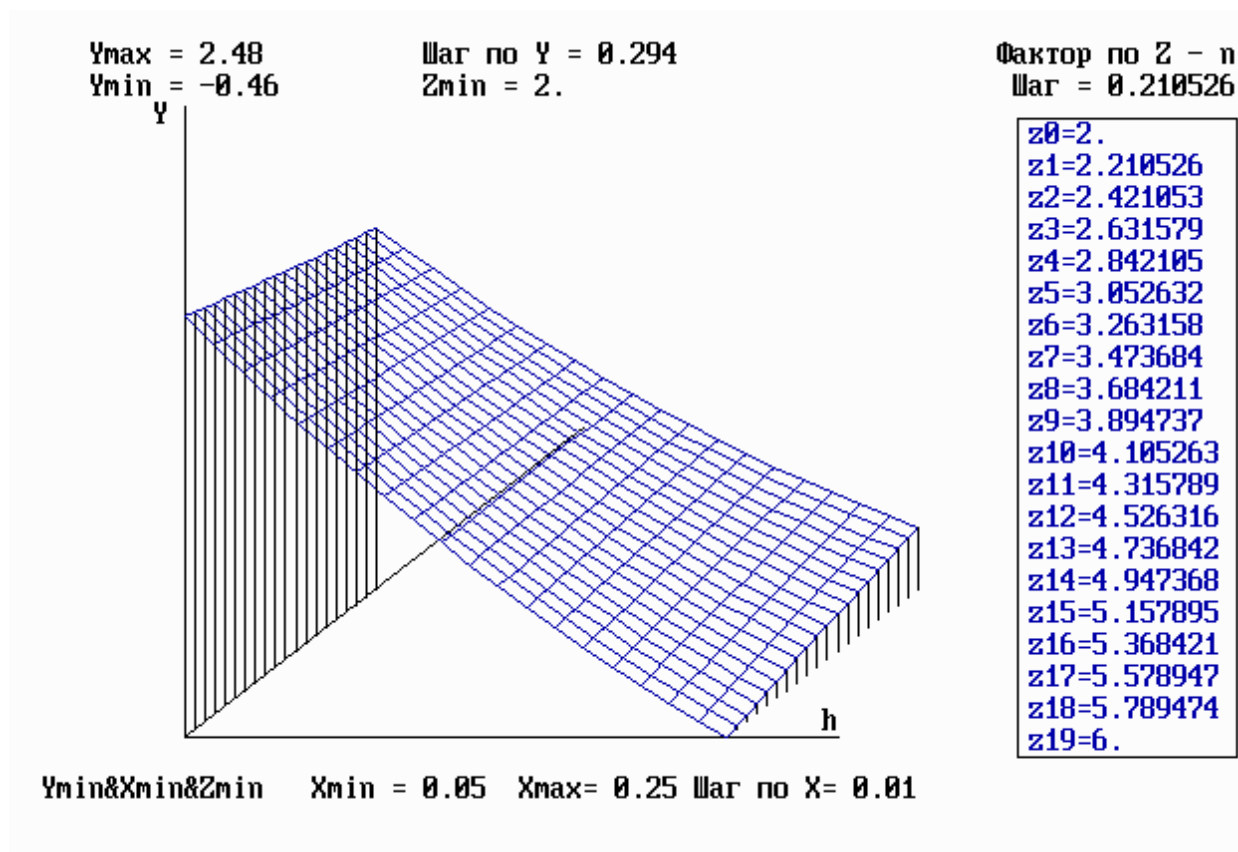
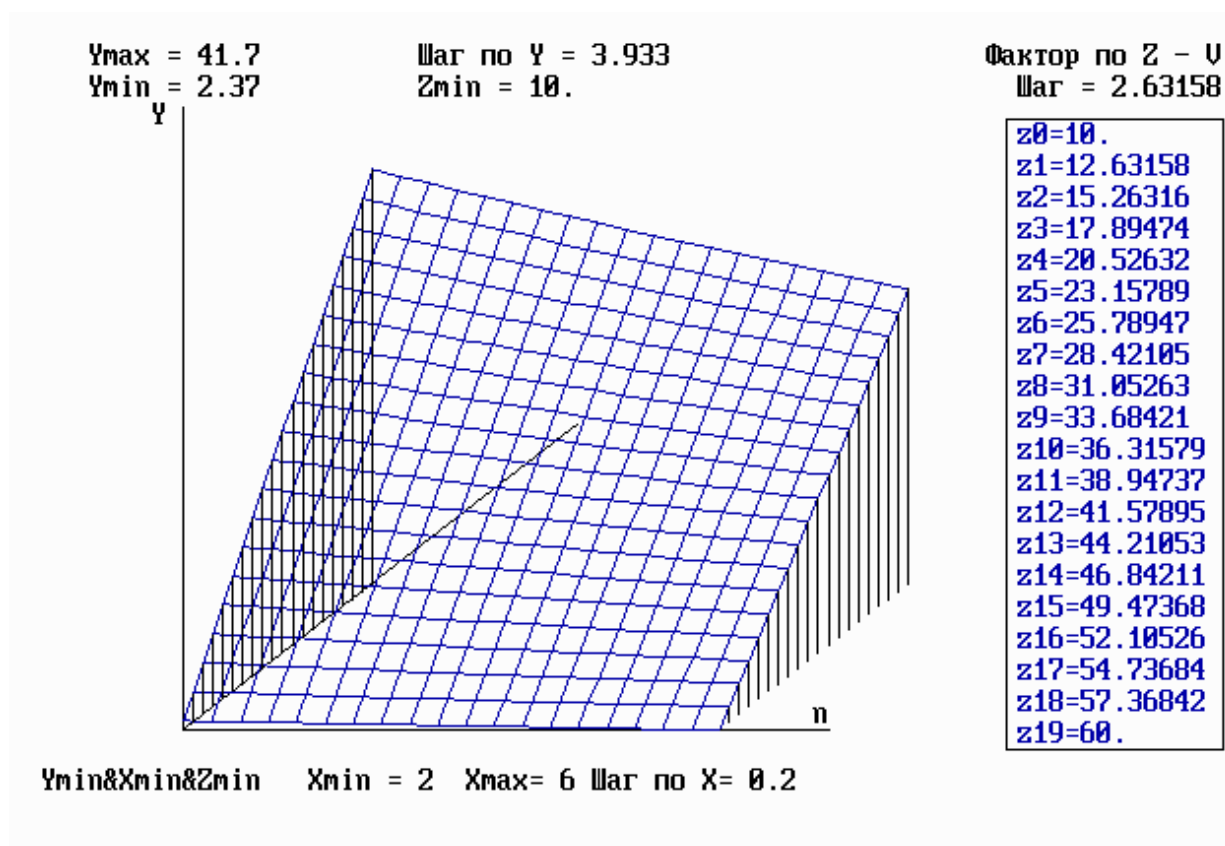


Рисунок 2.5.3. Маргінальна поверхня відгуку для Δk_x (при $V = 60$)Рисунок 2.5.4. Маргінальна поверхня відгуку для Δk_y (при $h = 0,25$)

Оскільки план має властивості, які забезпечують пошук оптимальних умов, то ми можемо провести багатокритеріальну оптимізацію за результатами експерименту методом введення метрики в простір цільових функцій [4, 5]. При оптимізації для отримання узагальненого критерію з відліком від ідеалу введена фіктивний експеримент, в якому всі зміщення дорівнюють нулю. Всі три показники вважаються рівнозначними. Була проведена оптимізація (Табл. 2.5.2).

Зауважимо, що результат оптимізації досить далекий (0,737486062) від ідеального і вимагає подальшої роботи.

Таблиця 2.5.2. Результати пошуку оптимального об'єкту

Критерії	Δk_x	Δk_y	Δk_{xz}
Цілі	min	min	min

Вагові коефіцієнти	0,333333333	0,333333	0,333333
Об'єкти	Ефективність		
5	0,737486062		
3	0,721474978		
4	0,688379336		
2	0,63921573		
7	0,401841885		
1	0,397227194		
8	0,306383643		
6	0,142365352		
Найкраща точка			
№ досліду	Значення факторів		
	h	n	v
5	0,15	4	40

2.6. Висновки й інтерпретація результатів

За проведеним експериментом побудовані регресійні моделі, які описують залежність відхилення від номіналу по трьом координатам від висоти шару (h , мм), швидкості друку (V , мм/с) і кількості ліній стінки (n). В ході оцінки експерименту при виготовленні зразків було з'ясовано, що моделі мають достатньо добрі статистичні характеристики, а саме: інформативність, адекватність, структурну і обчислювальну стійкість. Дані результати допоможуть чітко зрозуміти чи

виготовлена деталь підходить під стандартизовані показники та чи можна її піддавати подальшій експлуатації. При аналізі проведення побудови та візуалізації маргінальних поверхонь відгуку, можна ще раз впевнитися в тому, що моделі мають незначну лінійність. Тобто, загалом модель являє собою лінійну залежність, але на деяких проміжках її поверхні можуть з'являтися неточності, у вигляді часткової нерівності.

Також було виконано аналіз структури моделей, з якого випливає, що основний вклад у відхилення визначається лінійними складовими факторів. А це значно спрощує і полегшує керування відхиленнями. Адже є можливість в подальшій роботі передбачити реакції цієї моделі на зміну деяких характеристик, наприклад температури.

Проведена багатокритеріальна оптимізація за експериментальними даними, яку дозволяє вибраний план експерименту, для пошуку значень факторів, які забезпечують мінімальне відхилення при даній області експерименту (факторного простору) .

Слід зауважити, що провівши достатню кількість експериментів подібного характеру можна визначити величину середніх статистичних значень параметрів точності, що дозволить сформувати відповідне поле розсіювання. Оперуючи цими даними, ми матимемо змогу користуватися інструментами розмірного моделювання та перевіряти технологічні параметри друку деталей.

РОЗДІЛ 3

3.1. Планування перевірки

Після виконання роботи, що була описана в попередньому розділі, а саме моделювання точності 3Д-друку, необхідно перейти до перевірки даної моделі, а точніше її працездатності в ході експлуатації. В процесі перевірки, можливим буде точно дізнатись чи можна в подальшому використовувати дану модель та чи буде вона корисною і доцільною при розрахунку розмірів корекції розмірів.

В ході аналізу цього зразка слід перевірити й інші показники та характеристики. А саме екстраполяльність моделі, тобто здатність працювати у всіх діапазонах за одним законом. Хоча необхідно врахувати те, що модель має бути інтерполярною. Можливість даного припущення була зроблена на основі того, що модель є лінійною.

Для проведення перевірки були обрані такі режими друку як $h = 0,2$ (висота друкованого шару), $n = 4$ (кількість ліній стінки) та $V = 50$ мм/хв (швидкість друку). Дані режими не являються оптимальними для друку, але мають достатні характеристики для виконання даного процесу і є середніми (Табл. 3.1.1).

Таблиця 3.1.1 Режими друку для перевірки

X1	X2	X3
h	n	V
0,2	4	50

Після встановлення режимів друку, на їх основі були розраховані коефіцієнти, які надалі будуть використані при розрахунку корекції розмірів. (Табл. 3.1.2).

Таблиця 3.1.2 Розрахункові коефіцієнти моделі

x1	z1	x2	x3	u3
1,000001	0,750004	-0,11111	0,333334	-1

На основі попередніх обрахунків розраховується корекція розміру для кожної з осей друку. Слід зазначити, що розрахунковий розмір корекції – це коректор на одну сторону (Табл. 3.1.3).

Таблиця 3.1.3 Розмірність корекції для кожної осі

dkX	dkY	dkZ
0,041	0,044	0,053

Для порівняння слід надрукувати деталі без корекції, але з тими самими режимами друку. Таким чином ми зможемо наглядно оцінити працездатність роботи моделі та зробити відповідні висновки.

3.2. Проектування дослідного зразка

Для перевірки моделі розроблено дослідні зразки (Додатки). Вони представляють собою збірну конструкцію, котра в свою чергу складається з двох деталей. Кришка являє собою пластину з бобишкою квадратної форми із заокругленими краями в системі валу (Рис. 3.2.1). Корпус має отвір квадратної форми з допуском в системі отвору, що має забезпечувати гарантоване з’єднання елементів збірки (Рис. 3.2.2).

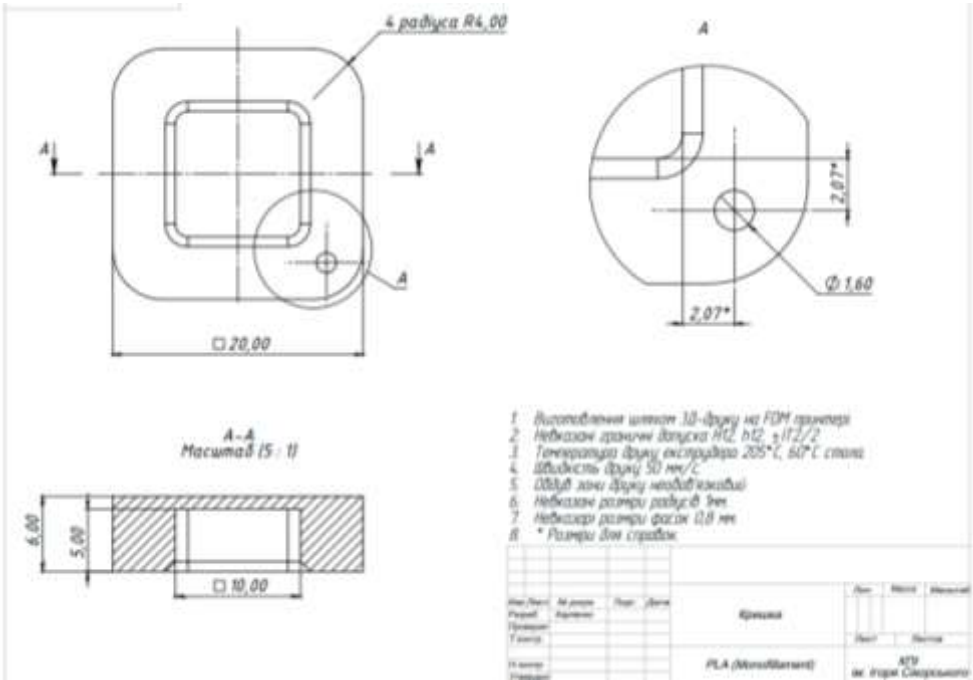


Рисунок 3.2.1 Кресленик деталі «Корпус»

Зразки для перевірки друкуватимуться пластиком відмінним від того який використовувався для експериментальних зразків у попередньому розділі. У зв’язку з цим можлива часткова невідповідність результатів.

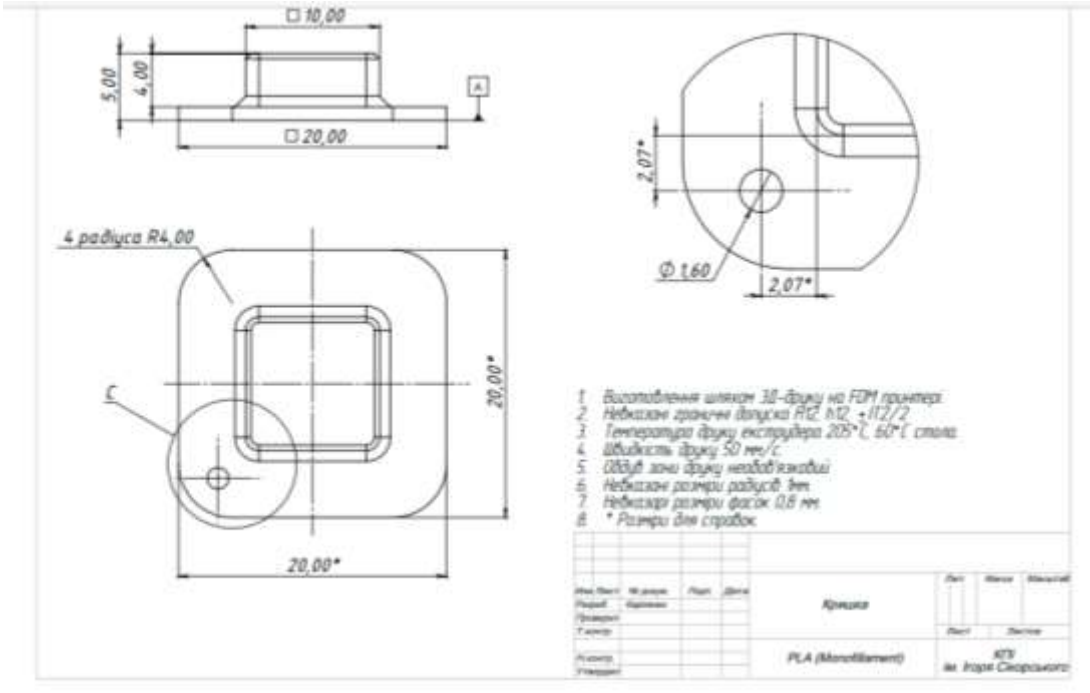


Рисунок 3.2.2 Кресленик деталі «Кришка»

3.3. Підготовка зразків

Для друку зразків розроблені 3Д моделі (Рис. 3.3.1 – 3.3.2) котрі відповідають кресленикам. Дані моделі друкувалися без внесення коректив у розміри (Рис. 3.3.3).

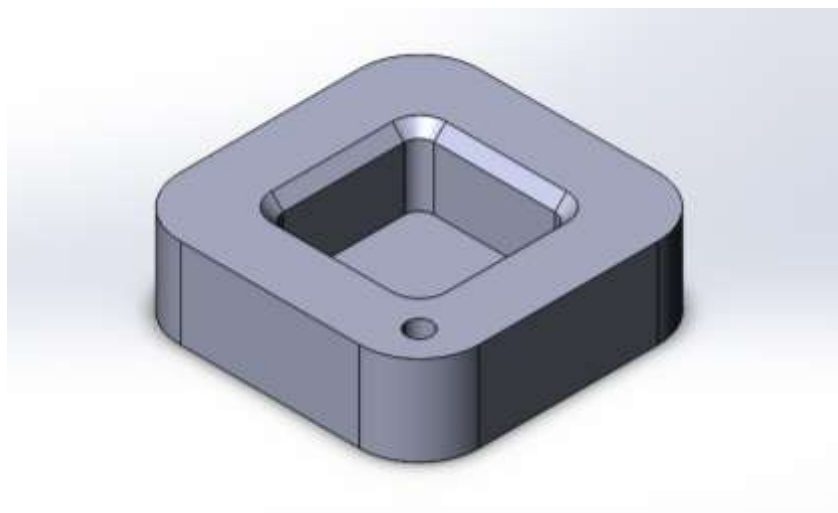


Рисунок 3.3.1 Модель деталі «Корпус»

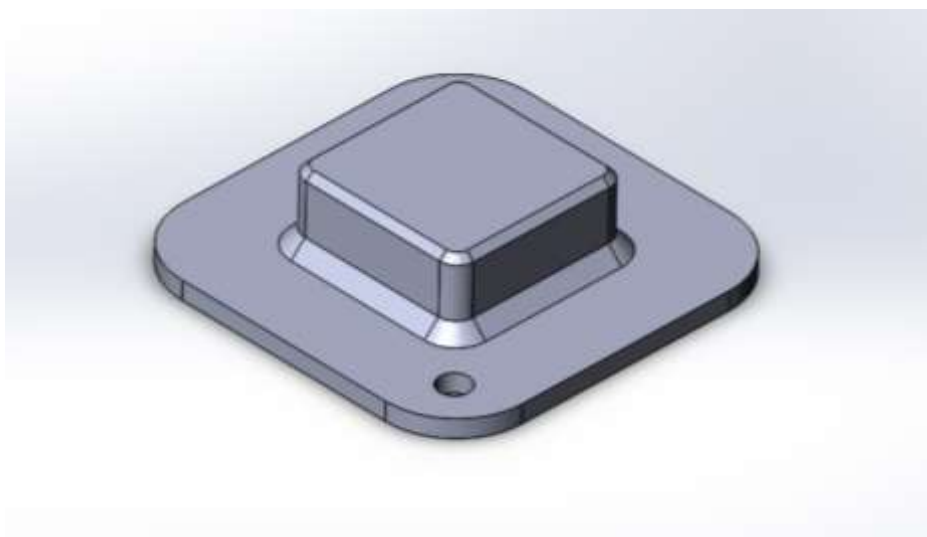


Рисунок 3.3.2 Модель деталі «Кришка»



Рисунок 3.3.4 Готові деталі

Керуючу програму з відповідними режимами друку (Рис. 3.3.4) створено в програмному продукті Ultimaker Cura 4.6.

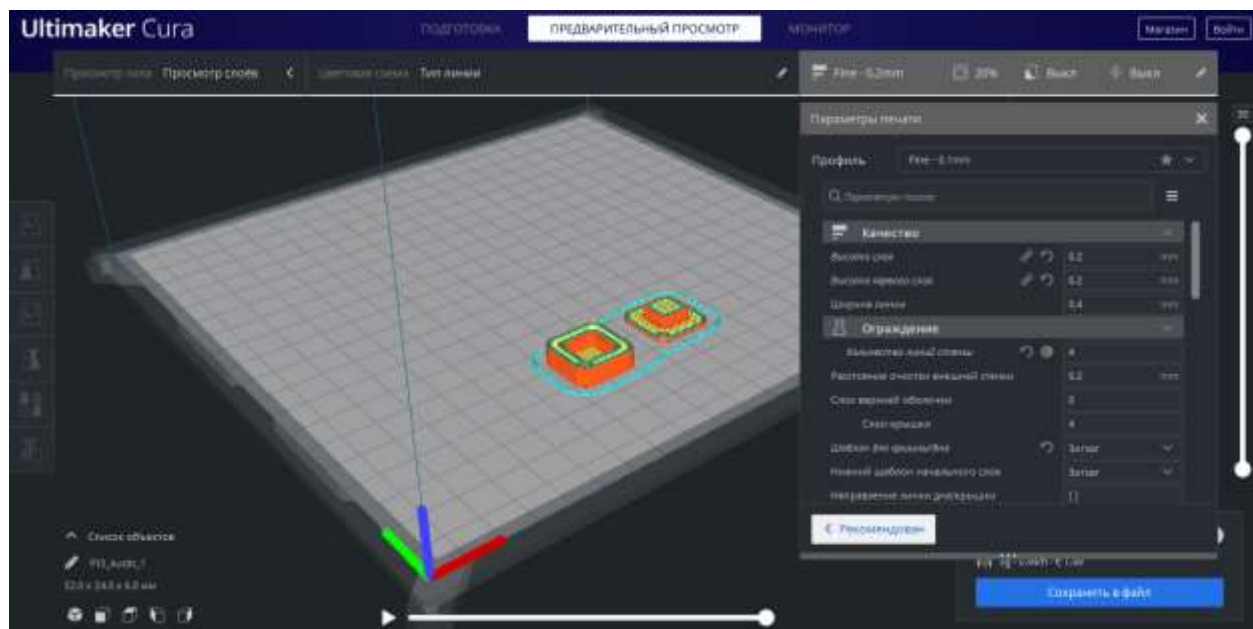


Рисунок 3.3.4 Діалогове вікно програми Ultimaker Cura 4.6

Результати були відповідні, надруковані деталі не відповідають номінальним розмірам (Рис. 3.3.5).



Рисунок 3.3.5 Розміри деталей друкованих без корекції

Як видно на попередньому рисунку розміри на 90 мікрон більший від номінального. Звернувшись до таблиці 3.1.3 ми бачимо що розрахунковий розмір корекції становить 40 мікрон на сторону, тобто в нашому випадку модель працює.

Після здійснення корекції розмірів моделі на відповідні значення та друку були отримані відповідні розміри, а саме 9,99 мм для розміру 10мм (Рис.3.3.6).



Рисунок 3.3.6 Розміри деталей друкованих з корекцією

3.4. Висновки

Після перевірки працездатності моделі можна зробити висновок, що вона працює та може бути використана на практиці. Дані судження зроблені на основі обрахунків та за наочної демонстрації. Як було показано вище, при порівнянні двох деталей з корекцією та без неї, було виявлено відмінності за розмірних показників. Після проведення корекції розміри деталі відповідали номінальним розмірам. Ці результати підтвердили гіпотези щодо вдалості та практичності використання і активного впровадження методики моделювання точності 3Д-друку. Адже завдяки даній технології можливо передбачити наперед майбутні недоліки готової деталі та усунути їх ще до початку друку. Вищенаведене порівняння це яскраво підтвердило. Адже перевірка показала надзвичайно гарні результати з котрими можна працювати далі та розвивати дану методику моделювання точності 3Д-друку.

Отже, впровадження даної методики полегшить виробництво та зменшить кількість використаних матеріалів, а її дієвість успішно перевірена на практиці.

РОЗДІЛ 4

Метою розгляду даного розділу є проведення аналізу стартап – проекту для визначення принципової можливості його ринкового впровадження та встановлення можливих напрямів реалізації [10]. В ході аналізу буде виявлено чи придатний даний стартап для реалізації на ринку та чи вигідним є його виробництво і вдосконалення. Аналіз включає в себе опис ідеї, технологічний аудит, розгляд потенційного ринку, а також розроблення ринкової стратегії та маркетингової програми.

4.1 Опис ідеї проекту

Для початку необхідно зазначити, що результати, які отримані в даній роботі не можуть реалізуватися на ринку напряму, так як були розглянуті лише ймовірні можливості. Тому стартап-проект буде базуватися на впровадженні методики прогнозування розмірів друкованих деталей та аналіз їх збираємості. У таблиці 4.1 надається інформація, яка в повну міру надає зміст ідеї, можливі базові потенційні ринки та вигоди для користувача. Техніко-економічні переваги описані у таблиці 4.2.

Таблиця 4.1 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Прогнозування розмірів друкованих деталей та аналіз їх збираємості	Виробництва, що використовують адаптивні технології	Економія часу та ресурсів

Таблиця 4.2 – Аналіз техніко-економічних переваг ідеї

	Мій проект	Технології конкурентів
Точність визначення	На точність впливають режими друку моделей, використовувані матеріали та обладнання у вигляді 3Д-принтерів	На даний момент не було знайдено нічого подібного
Затрати часу	Затрати лише на розрахунок розміру корекції	Затрати на друк пробних зразків
Універсальність	Не потребує виготовлення пробних зразків	Слід в достатньому обсязі розуміти суть процесу

За результатами таблиць можна побачити, що даний проєкт займає досить вузьку нішу, адже використання адаптивних технологій наразі не є поширеним явищем. Оцінюючи переваги, то можна сказати, що запропонований стартап може бути цікавим для споживачів, адже завдяки йому можна скоротити час на виготовлення продукції та зменшити кількість затрачених ресурсів, шляхом зниження чисельності браку, що на виробництві безумовно є в пріоритеті.

4.2 Технологічний аудит ідеї проєкту

Наступним кроком в аналізі стартап-ідеї є аудит технології, за допомогою якого можна реалізувати ідею проєкту та визначити технологічну її

здійсненність[10]. Для цього необхідно оцінити технології для реалізації проекту, її доступність. Дана оцінка описана в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

Ідея проекту	Наявність технологій	Доступність технології
Створення методики проведення експерименту з метою моделювання точності 3Д-друку та розрахунок розміру корекції розмірів	Створення емпіричної моделі на основі проведеного експерименту	Будь-який 3Д-принтер призначений для друку пластиком
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: створення емпіричної моделі на основі проведеного експерименту		

За результатами таблиці можна зробити висновок, що технічна реалізація проекту можлива. Адже для її втілення необхідне створення емпіричної моделі, що базується на аналізі даних експерименту, що є достатньо доступним для загального відтворення. А завдяки достатньо високій доступності, що пояснюється лише наявністю 3Д-принтеру, поширення і впровадження даного проекту буде успішним. Отже, можна стверджувати, що вищезазначені характеристики позитивно сприяють реалізації проекту.

4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Після завершення аналізу самого проекту, слід перейти до визначення ринкових можливостей. Давши їм оцінку, ми можемо використати їх під час реалізації ринкового впровадження проекту та при визначенні ринкових загроз, які

можуть перешкодити його реалізації. Цей аналіз дозволить спрогнозувати напрямки розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів- конкурентів[10].

Проаналізувавши попит, було визначено, що на ринку немає подібної технології, тому враховуючи попереднє оцінювання стартапу, можна зробити висновок, що даний проєкт є привабливим для входження з ним на ринок. Також варто звернути увагу на те, що сьогодні досягнуто високо рівня автоматизації та роботизації, тому на даному сегменті ринку можна спостерігати зростаючу динаміку. Вищеназвані аспекти науково-технічного прогресу сприяють тому, що більшість виробництв починає використовувати сучасні засоби автоматизації[10]. Тому цілком можливо, що значна частка цих підприємств буде зацікавлена у впровадженні або вдосконаленні адаптивних технологій у процесі свого виробництва, з метою пришвидшення ходу власної автоматизації виготовлення продукції, що дасть їм змогу стати більш конкурентноспроможними на своєму сегменті ринку.

Визначення потенційних груп клієнтів, їх характеристики та формування орієнтованого переліку вимог до товару для кожної групи зазначено у таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія	Вимоги споживачів до товару
Забезпечення точності друкованих моделей	Виробництва, на яких використовуються адаптивні технології, в особливості 3Д-друк	- Простота використання - Точність

Дана таблиця дала можливість оцінити цільову аудиторію та її вимоги. Якщо говорити про потенційних споживачів, то їх кількість буде збільшуватись в геометричній прогресії, що зумовлено, як було сказано раніше, стрімким розвитком і впровадженням автоматизації на виробництвах. Щодо вимог, то вони сформульовані як простота використання та точність. Ці два показники, які допомагають виробництвам пришвидшити їх процес виготовлення продукції, може бути забезпеченим саме даним проєктом.

Після визначення потенційних груп клієнтів та їх потреб, було проаналізовано ринкове середовище: розроблено таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проєкту та факторів його перешкоджання. В таблицях 4.5 і 4.6 надані фактори в порядку зменшення значущості[10].

Таблиця 4.5 – Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Точність	Недостатня точність друкованих моделей	Відмова від використання

Таблиця 4.6 – Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Універсальність	Можливість швидкого	Впровадження технології у

		прогнозування розмірів друкованих моделей	виробництво
--	--	--	-------------

Щодо фактору загроз, то в разі недостатньої точності можливе поступове вдосконалення технології, доки не буде досягнутий необхідний показник точності.

Далі для повноцінного аналізу ринку необхідно провести аналіз пропозиції, що діє на ринку. А саме визначаються загальні риси конкуренції, яка наявна на даному сегменті. Згідно цим характеристикам, можна більш точно оцінити власну конкурентноспроможність та можливість задовольнити власного споживача, а також отримати прибутки. Дані характеристики описані в таблиці 4.7[10].

Таблиця 4.7 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Вказати тип конкуренції - монополія/олігополія монополістична/чиста	Чиста	Вплив на універсальність

2. За рівнем конкурентної боротьби - локальний/ національний/...	Локальний	Переваги запропонованих можливостей
3. За галузевою ознакою - міжгалузева/ внутрішньогалузева	Внутрішньогалузева	Можливість швидкого прогнозування розмірів друкованих моделей
4. Конкуренція за видами товарів: - товарно-родова - товарно-видова - між бажаннями	Товарно- родова	Конкуренція між використанням різних технологій для виконання однакової мети
5. За характером конкурентних переваг - цінова / нецінова	Цінова	Основною перевагою є скорочення часу що позитивно впливає на економічні аспекти

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities) на основі виділених ринкових загроз та можливостей, та сильних і слабких сторін наведених у таблиці

4.8[10]. На базі даного аналізу можливе виділення ефективних рішень для реакції проєкту відповідно до параметрів зовнішнього простору.

Перелік ринкових загроз та ринкових можливостей складається на основі аналізу факторів загроз та факторів можливостей маркетингового середовища. Щодо першого – ринкових загроз – то вони проявляються у тенденціях у зовнішньому середовищі, які без вчасної реакції на них створюють погіршення стану даного проєкту. Ринкові можливості – це також тенденції зовнішнього середовища, але які за правильної реакції проєкту на них, створює сприятливі умови для подальшого його розвитку. Ринкові загрози та ринкові можливості є наслідками (прогнозованими результатами) впливу факторів, і, на відміну від них, ще не є реалізованими на ринку та мають певну ймовірність здійснення[10].

Таблиця 4.8 – SWOT-аналіз стартап-проєкту

Сильні сторони	Слабкі сторони
1. Універсальність використання 2. Скорочення часу налаштування. 3. Зменшення кількості браку на виробництві	1. Новизна проєкту.
Можливості	Загрози
1. Зацікавлення виробництв які впроваджують адаптивні технології. 2. Достатнє поширення у зв'язку із	1. Недостатня точність за вимогами виробництва.

прогресивністю ідеї	
---------------------	--

Проводячи підсумок даних таблиці, можна помітити, що на даному етапі аналізу позитивних якостей більше та що стосується негативних сторін, то є велика ймовірність їх усунення за вчасної реакції. Це в свою чергу створить чудову платформу для вдосконалення нової технології і тим самим сприятиме поширенню її на ринку.

4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Проаналізувавши всі фактори ринку, можна переходити до розробки ринкової стратегії. Першим кроком в даній розробці буде визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових потенційних споживачів. Так як цільова аудиторія лише одна, а саме виробництва на яких використовуються або впроваджуються адаптивні технології, то стратегія охоплення ринку – стратегія концентрованого маркетингу. Даний вид стратегії було вибрано виходячи з того, що компанія зосереджується на одному сегменті та має достатню нішевість пропонування своєї послуги[10].

Для роботи на обраному сегменті ринку необхідно сформувати базову стратегію розвитку, яка наведена в таблиці 4.9[10].

Таблиця 4.9 – Визначення базової стратегії розвитку

Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
Глибоке проникнення на	Концентрований	Задоволення потреб вибраного цільового	Стратегія

ринок	маркетинг	сегменту краще, ніж конкуренти.	спеціалізації
-------	-----------	---------------------------------	---------------

Виходячи з таблиці 4.9, базова стратегія розвитку – стратегія спеціалізації. Особливість даної стратегії в тому, що вона передбачає зосередження на потребах однієї групи(сегменту) споживачів і немає на меті охопити весь ринок. Ціллю цієї стратегії є створення унікальної продукції і за рахунок цього отримання конкурентної переваги.

Наступним етапом є вибір стратегії конкурентної поведінки, що наведені в таблиці 4.10[10].

Таблиця 4.10 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента?	Стратегія конкурентної поведінки
Так	Так	Ні	Стратегія лідера
Так	Так	Ні	Стратегія виклику лідера
Ні	Так	Так	Стратегія наслідування лідера

Ні	Ні	Так	Стратегія зайняття конкурентної ніші
----	----	-----	---

За таблицею 4.10 обираємо стратегію виклику лідера. Основною метою даної стратегії є зайняття позиції лідера в даному сегменті ринку.

На основі вимог споживачів з обраних сегментів до постачальника (стартап-компанії) та до продукту, а також в залежності від обраної базової стратегії розвитку розробляємо стратегію позиціонування, яка наведена у таблиці 4.11, що полягає у формуванні ринкової позиції, за яким споживачі мають ідентифікувати торгівельний проєкт[10]. Також особливістю обраної стратегії є досягнення прихильності споживача за рахунок відмінностей даного товару від товару конкурентів.

Таблиця 4.11 – Визначення стратегії позиціонування

Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проєкту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проєкту
Точність, універсальність	Стратегія спеціалізації	Простота впровадження, швидкість	Унікальність, універсальність

		налаштування виробництва	
--	--	-----------------------------	--

4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Першим кроком є формування маркетингової концепції товару, який отримає споживач. Для цього потрібно підсумувати результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару. Він говорить нам про те, що ключовою перевагою нашого продукту є прогнозування точності друкованих моделей з можливістю їх попередньої корекції, яка задовольнить потребу виробництв в скороченні часу на налаштування [10]. В результаті прогнозування з'являється можливість скорочувати не лише час, а і кількість затраченого матеріалу та відходів виробництва, що в свою чергу також є в пріоритеті потенційного користувача.

Надалі, виходячи з попереднього аналізу, розроблено трирівневу маркетингову модель товару: уточнюється ідея продукту/послуги, його фізичні складові, особливості процесу його надання. Опис даних показників наданий в таблиці 4.12[10].

Таблиця 4.12 – Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові
I. Товар за задумом	Можливість моделювати точність друкованих моделей та визначати розмірність коректорів
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики: універсальний та відносна точність
	Застосування в адаптивних технологіях, а саме

	в 3д-друці
III. Товар із підкріпленням	Повне впровадження технології з цілодобовою можливістю консультації
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: Патент.	

Визначення цінових меж, якими необхідно керуватись при встановленні ціни на потенційний товар є недоцільним, оскільки остаточне визначення ціни відбувається під час фінансово-економічного аналізу проекту, наявність повної інформації та готового технічного рішення для виготовлення[10]. При більш детальному аналізі фінансової складової реалізації проекту може бути вирахована собівартість реалізації та можливі прибутки.

Наступним кроком є визначення оптимальної системи збуту, в межах якої приймається рішення, результат наведений в таблиці 4.13:

- збут буде проводитись власними силами, тобто буде реалізовано власну систему збуту;

- оптимальна глибина каналу збуту: канал збуту нульового рівня

(виробник сам продає товар кінцевому споживачеві).

Таблиця 4.13 – Формування системи збуту

Специфіка	Функції збуту, які	Глибина каналу	Оптимальна
-----------	--------------------	----------------	------------

закупівельної поведінки цільових клієнтів	має виконувати Постачальник товару	збуту	система збуту
Характерно для галузей машинобудування дрібними серіями з дорогим товаром, який може бути придбаний обмеженим числом споживачів.	Просування на ринок подібного продукту в рамках даної системи збуту не вимагає будь-якої широкої реклами.	Канал нульового рівня	Канал складається з виробника, який продає свій товар безпосередньо споживачам.

Останньою складовою маркетингової програми є розроблення концепції маркетингових комунікацій, що спирається на попередньо обрану основу для позиціонування, визначену специфіку поведінки клієнтів, яка надана в таблиці 4.14[10]. Концепція маркетингових комунікацій визначається набором засобів зв'язку для вдалого спілкування та взаємодії виробника та споживача. Правильно сформована концепція комунікації дає змогу проводити активну діяльність з просування товару та забезпечення достатнього рівня задоволеності споживача, тобто створює двосторонню взаємодію.

Таблиця 4.14 – Концепція маркетингових комунікацій

Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
Характерно для виробництв: дрібними серіями з дорогим товаром, що придбачаються обмеженим числом споживачів.	Включають в себе пряму поштову розсилку, замовлення по електронному каталогу і продаж в режимі онлайн.	Конкурентне позиціонування, яке базується на демонстрації переваг товарів підприємства над товарами конкурентів.	Отримати можливість у кілька разів збільшити обсяг продажу своїх товарів	Головними елементами структури реклами є тема реклами і девіз рекламної кампанії.

4.6 Висновки розділу

Під час створення стартап-проекту було виконано аналіз можливостей ринкової комерціалізації проекту. Після отримання даних аналізу було з'ясовано, що

технологічна реалізація проекту можлива. Згідно аналізу ринку, попередньо схожої технології не було знайдено, даний стартап є першим у цьому сегменті.

В ході роботи було надано його сильні та слабкі сторони, напрямки впровадження та вигоди для користувачів. Головними позитивними якостями даної ідеї є те, що вона універсальна, тобто є можливість підлаштовуватись під різні види 3Д-принтерів, актуальна в епоху масової автоматизації та спрощення процесу виробництва, а також має велику платформу для подальшого вдосконалення.

Розглянута сфера є цікавою для входження в неї через те, що технологія є унікальною. Даний висновок зроблений на основі того, що на ринку не має конкурентів та поки що не наявні аналоги запропонованої технології. Щодо перешкод для виходу на ринок, то їх не виявлено, адже як вже було сказано конкуренції немає, тому не будуть створюватись бар'єри для входу.

Стратегією для розвитку була обрана стратегія спеціалізації. Даний вибір базується на тому, що цільова аудиторія є достатньо нішевою та вузькоспеціалізованою. Тому стратегія розвитку має мати вузький напрям для вдалої реалізації продукту.

Після детального аналізу дослідження проекту, можна стверджувати що він є унікальним та має перспективи для розвитку. Підтвердженням цього є вищенаведені таблиці та висновки. Тому дана стартап ідея є хорошим бізнес-проектом, що безумовно заповнить свою ринкову нішу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Дрейпер, Н. Прикладной регрессионный анализ / Н. Дрейпер, Г. Смит –Изд. 3-е. –М.: Диалектика, 2007. –912с.

2. Лапач С.Н., Радченко С.Г., Бабич П.Н. Планирование, регрессия и анализ моделей PRIAM (ПРИАМ) / Каталог программные продукты Украины. К.: 1993. С. 24-27.
3. С.Н. Лапач, А.В. Чубенко, П.Н. Бабич Статистические методы в медико-биологических исследованиях с использованием Excel –2 изд. перераб. и доп. –К.: 2001, Морион. – 408с.
4. Лапач С.Н. Робастные планы эксперимента / Математичні машини і системи, 2016, № 4, С. 111-121.
5. Оптимизация технологических условий сварки полиэтиленовых труб / С.Г. Радченко, Ю.С. Бурбело, Э.В. Котенко, С.Н. Лапач, Ю.А. Сидоренко, В.С. Лищинский // Пластические массы.–1988.– №9.–С.29–31.
6. Filamentarno. Тонкости 3D-печати. Часть 1. Полимеры. [Электронный ресурс] Filamentarno.–2509. –Режим допуску до джерела:
<https://3dtoday.ru/blogs/filamentarno/the-intricacies-of-3d-printing-part-1-polymers/>.
7. Effect of Layer Thickness and Printing Orientation on Mechanical Properties and Dimensional Accuracy of 3D Printed Porous Samples for Bone Tissue Engineering [Электронный ресурс]. – 2014. – Режим доступу до ресурсу:
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4169505/>.
8. Effect of layer printing delay on mechanical properties and dimensional accuracy of 3D printed porous prototypes in bone tissue engineering [Электронный ресурс] – Режим доступу до ресурсу:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884215004010>.
9. А. Е. Зверовщиков, Д. С. Исследование точности размеров, обеспечиваемых технологией 3D-печати / Д. А. Шелахаев С. А. Нестеров А. Е. Зверовщиков,. – 2019. – С. 13.
10. Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс]: Методичні рекомендації до виконання розділу магістерської дисертації для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с.

11. Министерство высшего и среднего специального образования РСФСР. РД 50-635-87 Методические указания. Цепи размерные. Основные понятия. Методы расчета линейных и угловых цепей / Министерство высшего и среднего специального образования РСФСР. // Издательство стандартов (1987 г.). – 109.
12. Карпенко Б. О. Моделювання точності друку 3D принтера [Електронний ресурс] / Б. О. Карпенко, С. М. Лапач // Збірка праць Міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених та студентів «Інновації молоді в машинобудуванні», 2019-2020 Youth Innovations in Mechanical Engineering Механіко-машинобудівний інститут Національного технічного університету України «. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: <http://imm-mmi.kpi.ua/proc/article/view/201726>

ДОДАТКИ